



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ  
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ  
ENERGETICKÝ ÚSTAV

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING  
ENERGY INSTITUTE

# VLIV DÉLKY LOPATKY VÍROVÉ TURBÍNY NA JEJÍ CHARAKTERISTIKU

THE AFFECT OF THE BLADE LENGTH ON THE SWIRL TURBINE CHARACTERISTIC

DIPLOMOVÁ PRÁCE  
MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE  
AUTHOR

BC. JAN PAVLÍČEK

VEDOUcí PRÁCE  
SUPERVISOR

DOC. ING. VLADIMÍR HABÁN, PH.D.

BRNO 2014



Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Energetický ústav

Akademický rok: 2013/14

## **ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE**

student(ka): Bc. Jan Pavlíček

který/která studuje v **magisterském studijním programu**

obor: **Fluidní inženýrství (2301T036)**

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma diplomové práce:

**Vliv délky lopatky virové turbíny na její charakteristiku**

v anglickém jazyce:

**The affect of the blade length on the swirl turbine characteristic**

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Při vývoji virové turbíny je možno měnit geometrii lopatek jejich zkrácením, tím dochází ke změně charakteristiky virové turbíny, mění se průtočnost a účinnost. Úkolem diplomanta bude provést měření původního oběžného kola. Následně provést měření pro několik variant zkrácení lopatek a tato měření porovnat.

Cíle diplomové práce:

Provést měření a zpracování měření virové turbíny.

Vyhodnotit změnu průtočné a účinnostní charakteristiky virové turbíny.

Vyhodnotit vstupní a výstupní rychlostní trojúhelníky.

Seznam odborné literatury:

Bude úkolem diplomanta provést literární rešerši problematicky.

Vedoucí diplomové práce: doc. Ing. Vladimír Habán, Ph.D.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2013/14.

V Brně, dne 27.11.2013 8:32:



doc. Ing. Zdeněk Skála, CSc.  
Ředitel ústavu

prof. RNDr. Miroslav Doupovec, CSc., dr. h. c.  
Děkan

## Abstrakt

Diplomová práce se zabývá vyhodnocením měření vírové turbíny, které byla postupně snižována délka lopatek. Předmětem zájmu byl vliv délky lopatky, především na účinnost měřené turbíny, a posouzení charakteru proudění na vstupu a výstupu z oběžného kola. Měřená data byla vyhodnocena pomocí výpočetního sešitu s podporou maker, který lze využít pro vyhodnocení dalších měření podobného charakteru. Různé chování turbíny v závislosti na délce lopatek oběžného kola bylo znázorněno v charakteristice turbíny a rychlostních trojúhelnících. Pro variantu s nejlepší dosaženou účinností byl sestrojen Q-H diagram využívaný při návrhu parametrů turbíny pro určitou lokalitu.

## Klíčová slova

Vírová turbína, délka lopatky, Q-H diagram, rychlostní trojúhelníky, účinnost vírové turbíny, charakteristika turbíny

---

## Abstract

This thesis deals with the evaluation of swirl turbine measurement, which the length of the turbine blades was gradually reduced. The subject of the effect was influence of the length of the blades, especially the measured efficiency of the turbine, and the character assessment of the flow at the inlet and outlet of the impeller. The measured data were analysed using the computing workbook with macro support, which can be used to evaluate other measurements of similar character. The different behaviour of the turbine depending on the length of the blades of the impeller was shown in the characteristics of the turbine and velocity triangles. For the variant with the best efficiency achieved was constructed QH diagram used in the design of turbine parameters for a particular location.

## Keywords

Swirl turbine, blade length, turbine application chart, velocity diagrams, velocity triangles, swirl turbine efficiency, characteristics of turbine

---

## Bibliografická citace

PAVLÍČEK, J. *Vliv délky lopatky virové turbíny na její charakteristiku*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2014. 91 s. Vedoucí diplomové práce doc. Ing. Vladimír Habán, Ph.D..

## Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci vypracoval samostatně na základě svých znalostí, odborných konzultací, literatury uvedené v seznamu na konci práce a pod vedením doc. Ing. Vladimíra Habána, Ph.D..

V Brně dne 25. 5. 2014

.....

---



## Poděkování

Rád bych toutu cestou poděkoval mému vedoucímu doc. Ing. Vladimíru Habánovi, Ph.D. za ochotu, rady a cenné připomínky při vedení diplomové práce a konzultacích. Stejně tak děkuji své rodině, přátelům a známým za jejich podporu a trpělivost.

## Obsah

Úvod.....	12
1 Vírová turbína.....	13
2 Popis zkušebního zařízení.....	15
2.1 Modelová vírová turbína .....	15
2.2 Univerzální zkušební stanice.....	15
2.3 Použitá měřicí technika .....	16
2.4 Měřicí software.....	19
2.5 Měření tlaku .....	19
2.6 Měřené varianty modelové turbíny .....	20
2.7 Hustota vody dle ČSN EN 60193.....	21
2.8 Kinematická viskozity dle ČSN EN 60193.....	21
2.9 Reynoldsovo číslo $Re$ .....	22
2.10 Ztrátový součinitel $\lambda$ dle Konakova .....	22
2.11 Skutečný krouticí moment na hřídeli turbíny.....	22
2.12 Měrná energie zpracovávaná turbínou .....	23
2.13 Účinnost modelové turbíny .....	23
3 Charakteristika modelové vírové turbíny 5VT200 .....	24
4 Rychlostní diagramy pro oběžné kolo .....	26
4.1 Unášivá rychlost.....	26
4.2 Meridiální složka absolutní rychlosti .....	27
4.3 Rychlosti na vstupu do oběžného kola .....	28
4.3.1 Unášivá rychlost.....	28
4.3.2 Meridiální složka absolutní rychlosti.....	28
4.3.3 Určení vstupního úhlu $\alpha_1$ .....	28
4.3.4 Průmět absolutní rychlosti do unášivého směru .....	34
4.3.5 Absolutní rychlost.....	35
4.3.6 Úhel mezi unášivou a relativní rychlostí.....	35
4.3.7 Relativní rychlost .....	35
4.4 Rychlosti na výstupu z oběžného kola .....	35
4.4.1 Unášivá rychlost.....	35
4.4.2 Meridiální složka absolutní rychlosti.....	35
4.4.3 Průmět absolutní rychlosti do unášivého směru .....	36
4.4.4 Výstupní úhel $\alpha_2$ .....	36
4.4.5 Absolutní rychlost.....	36

---

4.4.6	Úhel mezi unášivou a relativní rychlostí .....	37
5	Q-H diagram vírové turbíny .....	38
5.1	Průměr oběžného kola .....	38
5.2	Otáčky .....	38
5.3	Výkon .....	38
6	Nejistoty .....	40
6.1	Nejistota typu A .....	40
6.2	Nejistota typu B .....	40
6.3	Nejistota typu B pro průtok .....	40
6.4	Nejistota typu B pro tlak $p_1$ .....	41
6.5	Nejistota typu B pro tlak $p_2$ .....	41
6.6	Nejistota typu B pro tlakovou diferenci $\Delta p$ .....	42
6.7	Nejistota typu B pro otáčky $n$ .....	42
6.8	Nejistota typu B pro krouticí moment $M_k$ .....	43
6.9	Nejistota typu B pro měrnou energii .....	43
6.10	Nejistota typu B pro účinnost .....	44
6.11	Nejistota typu B pro jednotkové otáčky .....	44
6.12	Nejistota typu B pro jednotkový moment .....	45
6.13	Nejistota typu B pro jednotkový výkon .....	45
7	Automatizované vyhodnocení výsledků měření .....	46
7.1	Výpočty .....	46
7.1.1	Vstupní data .....	46
7.1.2	Konstanty .....	46
7.1.3	Tabulka vypočtených hodnot .....	46
7.2	Grafy .....	47
7.2.1	Rychlostní trojúhelníky .....	47
7.2.2	Grafy tří veličin .....	47
7.3	Q-H diagram .....	48
	Závěr .....	49
	Seznam použité literatury .....	50
	Seznam použitých zkratk a symbolů .....	51
	Seznam příloh .....	54

---

## Úvod

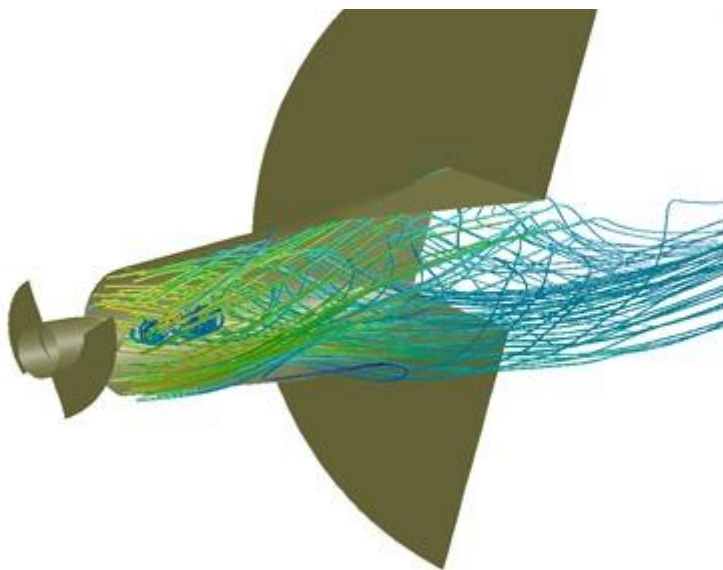
Diplomová práce se zabývá vyhodnocením měření modelové pětilopatové vírové turbíny, které byly v průběhu měření zkracovány lopatky. Cílem měření bylo zjistit, jakým způsobem ovlivňuje délka lopatky vlastnosti turbíny – především účinnost. Existoval předpoklad, že stejně jako u parních turbín či turbovrtulových leteckých motorů dochází k přenosu energie především na začátku lopatky a příliš dlouhé lopatky mají negativní vliv na účinnost tohoto procesu z důvodu ztrát třením po délce lopatky. Dále je výhodné z měřených hodnot vytvořit diagram znázorňující návrhové parametry turbíny pro lokalitu určenou spádem a průtokem.

Kromě vlivu na charakteristiku turbíny, bylo cílem prozkoumat proudění na vstupu a výstupu z oběžného kola modelové turbíny při různých variantách délek lopatek. A výsledky graficky znázornit v rychlostních diagramech.

Pro práci s naměřenými daty byl zvolen software Microsoft Excel, kde byly provedeny výpočty pro výše zmíněná zadání. Většina operací byla zautomatizována pomocí maker v jazyce VBA z důvodu zjednodušení dalšího plánovaného měření podobného charakteru.

## 1 Vírová turbína

Byla navržena v roce 2000 na Vysokém učení technickém v Brně, Fakultě strojního inženýrství, Odboru fluidního inženýrství Victora Kaplana týmem vedeným profesorem Františkem Pochylým. Jde o přetlakovou vodní turbínu vzdáleně podobnou turbíně Kaplanově. Na rozdíl od ní jsou však lopatky na oběžném kole pevné a absentuje zde také rozváděcí kolo, čímž se turbína stává konstrukčně jednodušší a tím i méně nákladnou. Právě nepřítomnost rozváděcího kola, které uděluje kapalině vstupující do oběžného kola turbíny rotaci, je tím revolučním rozdílem mezi vírovou turbínou a ostatními přetlakovými turbínami. Všechny dosavadní přetlakové turbíny jsou konstruovány tak, že voda do nich vtéká s rotační složkou ( $c_{u1}$ ) udělovanou rozváděčem a vytéká bez rotace ( $c_{u2} = 0$ ). U vírové turbíny je tomu naopak. Kapalina vchází do oběžného kola bez rotace ( $c_{u1} = 0$ ) a vytéká s nenulovou rotační složkou.[1]



Obrázek 1: Zobrazení proudění za oběžným kolem vírové turbíny; převzato[2]

Měrnou energii zpracovávanou oběžným kolem turbíny udává Eulerova turbínová rovnice:

$$Y_{id} \equiv Y \cdot \eta_h = c_{u1} \cdot u_1 - c_{u2} \cdot u_2 \quad (1.1)$$

Kde  $Y_{id}$  je ideální měrná energie [ $\text{Jkg}^{-1}$ ]

$Y$  je měrná energie turbíny [ $\text{Jkg}^{-1}$ ]

$\eta_h$  je hydraulická účinnost turbíny [1]

Index „1“ značí vstup a index „2“ značí výstup z oběžného kola

$c_{u1}$ ,  $c_{u2}$  jsou průměty absolutní rychlosti do unášivého směru [ $\text{ms}^{-1}$ ]

$u_1$ ,  $u_2$  jsou unášivé složky rychlosti [ $\text{ms}^{-1}$ ]

S přihlédnutím k rozdílům mezi dosavadními typy přetlakových turbín a turbínou vírovou lze pro ideální případy psát rovnici následovně [1] :

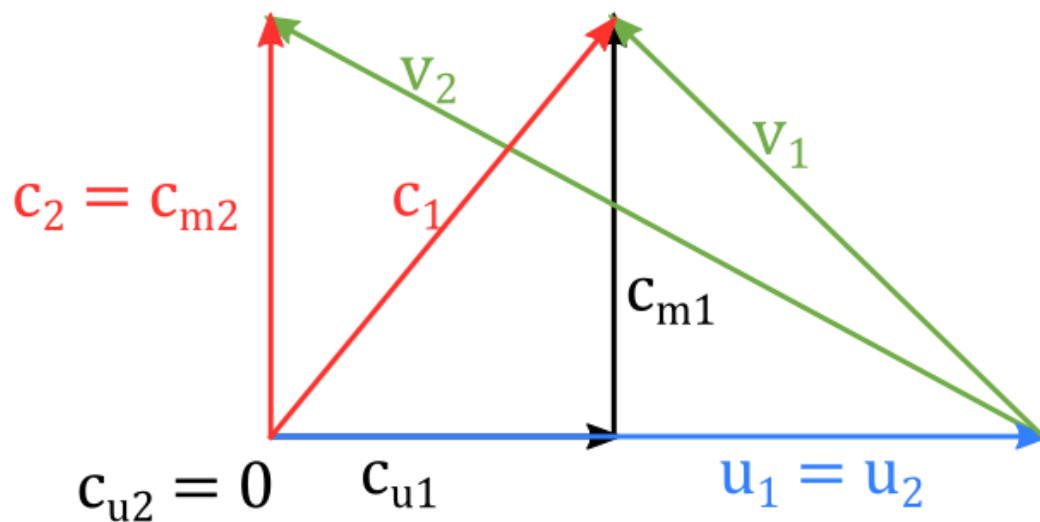
Běžné typy přetlakových turbín:

$$Y_{id} = c_{u1} \cdot u_1 \quad (1.2)$$

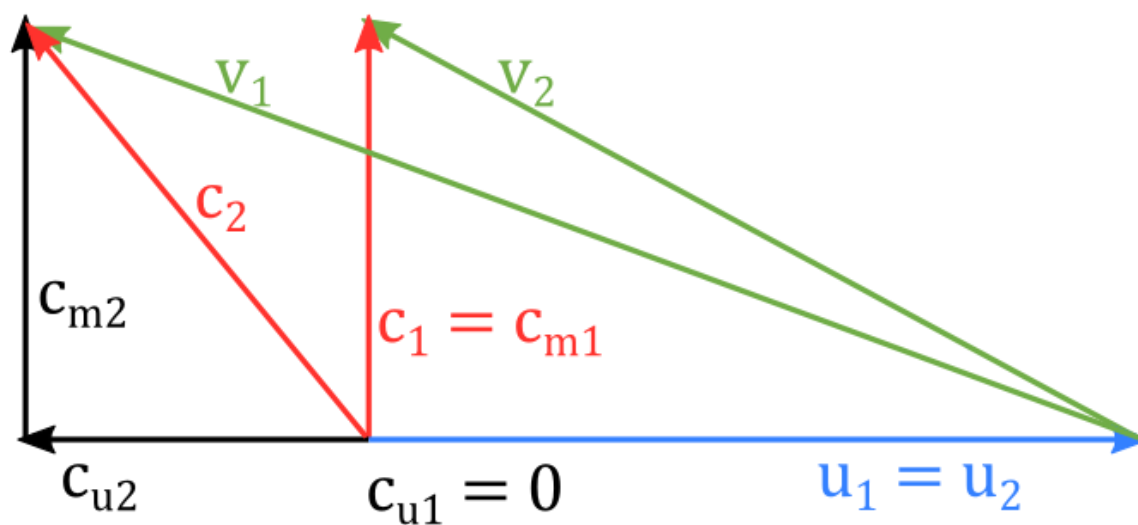
Vírová turbína:

$$Y_{id} = -c_{u2} \cdot u_2 \quad (1.3)$$

Rozdíl je též velmi dobře patrný při vykreslení jednotlivých složek rychlostí do rychlostních diagramů (trojúhelníků). Pro názornost byla jako zástupce běžných přetlakových turbín vybrána turbína Kaplanova.



Obrázek 2: Rychlostní diagram pro Kaplanovu turbínu



Obrázek 3: Rychlostní diagram pro vírovou turbínu

## 2 Popis zkušebního zařízení

### 2.1 Modelová vírová turbína

Jde o přímoproudou přetlakovou vírovou turbínu s pěti pevnými lopatkami s průměrem oběžného kola  $D = 200$  mm (označení 5VT200) a obtékanou převodovou skříní kuželovitěho tvaru s horizontálně uloženou hřídelí. [3]

Při měření byl hydraulický profil modelové turbíny tvořen axiálním vstupním trubkovým profilem s kruhovým průřezem o vnitřním průměru  $D_1 = 200$  mm, do nějž byla pomocí čtyř výstužných profilovaných žeber centricky ukotvena válcová hruška s polokulovou vstupní částí o průměru 157 mm. Hruška kryla vnitřní část turbíny včetně hřídele oběžného kola, která byla ukončené kuželovým převodem 1:1 navazujícím na výstupní hřídel – vedený mimo hrušku jedním ze čtyř kotvících žeber. [3]

Na vstupní profil navazuje kuželový prostor přecházející z původního vnitřního průměru 356 mm na konečný průměr 200 mm, stejný jako má válcová komora oběžného kola spolu s oběžným kolem použité modelové vírové turbíny s 25% nábojem (tj. o průměru 50 mm). Savka je pak tvořena dvěma kuželovitými díly s funkcí difuzoru, první díl o průměrech 200/237 mm s délkou 250 mm a druhý díl o průměrech 237/378 mm s délkou 900 mm. [3]

### 2.2 Univerzální zkušební stanice

Modelová vírová turbína byla zapojena do univerzální zkušební stanice (dále UZS) standardně sestávající se ze sacího kotle, podávacího čerpadla, regulační armatury, vodokružné vývěvy, přípojky tlakového vzduchu a stejnosměrného dynamometru připojeného přes pružnou spojku ke zkoušené modelové turbíně. K výše uvedeným částem byl připojen systém snímačů spolu s obvodovými silovými a měřicími. Měřené veličiny byly pomocí metalické kabeláže přenášeny a zpracovány průmyslovým PC umístěným v měřicí kabině. Jako pracovní látka sloužila voda do teploty 35 °C z rezervoáru laboratoře. [3]

Pro měření byl zvolen okruh obsahující:

- Standardní část UZS zahrnující sací kotel KS, potrubní úseky PÚS (převážně DN400 či DN500), rezervoár N, čerpadla Č1 a Č2, uzávěry U200, U210, U212, U214 a magnetoindukční průtokoměr SQ, včetně snímačů tlaku SP3 a teploty ST umístěných na KS.
- Měrný úsek UZS skládající se ze sací trouby turbíny PÚ1 a potrubních úseků PÚ2 spolu se snímačem tlaku SP1 umístěného v minimální vzdálenosti  $l_1 = 5d_1$  (kde  $d_1$  je světlostný průměr potrubí PÚ2) před hrdlem modelové turbíny.
- Modelovou turbínu 5VT200 napojenou hřídelem s pružnou spojkou na stanoviště dynamometru DS a sací troubou SP2 na sací kotel KS. Zahrnuje také snímač diferenciálního tlaku mezi přívodním potrubím SP1 a sací troubou SP2.
- Stanoviště stejnosměrného dynamometru DS napojeného pomocí pružné spojky PS na hřídel modelové turbíny. Stanoviště zahrnuje ovládací pult OP, rozvaděč RV a motorgenerátor MG spolu se snímačem otáček MO a snímačem kroutícího momentu MK.
- Řídící počítač PC pro příjem, záznam a výpočet dat dodávaných přes kartu unifikace měřených signálů KU napájenou zdrojem NZ.



## Stejnoseměrný dynamometr

---

16



*Snímač krouticího momentu – Měrná příruba HBM*

Označení ve schématu:	MK
Typ:	T10F
Rozsah:	50 Nm
Přesnost:	±0,2 % z rozsahu
Výrobce:	HBM

*Snímač otáček – inkrementální čidlo*

Označení ve schématu:	MO
Typ:	IRC 300
Rozsah:	4000 min <sup>-1</sup>
Přesnost:	±0,2 % z rozsahu
Výrobce:	LARM Netolice

*Snímač tlaku v přívodním potrubí*

Označení ve schématu:	SP1
Typ:	DMP 331
Rozsah:	6 bar (abs.)
Přesnost:	±0,25 % z rozsahu
Napájecí napětí:	12-36 V <sub>SS</sub>
Výstup:	0-20 mA
Výrobní číslo:	1000176256
Výrobce:	BD SENZORS s. r. o.
Dokumentace:	Katalogový list

*Snímač diferenciálního tlaku mezi přivaděčem a sací troubou turbíny*

Označení ve schématu:	dP
Typ:	LD 301
Rozsah:	12,5 – 500 mbar
Přesnost:	±0,1 % z rozsahu
Napájecí napětí:	12-45 V <sub>SS</sub>
Výstup:	4-20 mA
Výrobní číslo:	U 405164
Výrobce:	Smar GmbH Germany
Dokumentace:	Katalogový list

*Snímač tlaku v sacím kotli*

Označení ve schématu:	SP2
Typ:	DMP 331
Rozsah:	1,6 bar (abs.)
Přesnost:	±0,25 % z rozsahu
Napájecí napětí:	12-36 V <sub>SS</sub>
Výstup:	0-20 mA
Výrobní číslo:	116961197
Výrobce:	BD SENZORS s. r. o.
Dokumentace:	Katalogový list

*Snímač teploty vody*

Označení ve schématu:	ST
Typ:	HSO – 502 1A2L
Rozsah:	0-50 °C
Přesnost:	±0,1 % z rozsahu
Napájecí napětí:	12-36 V <sub>SS</sub>
Výstup:	4-20 mA
Výrobní číslo:	LA 339
Výrobce:	HIT Uherské Hradiště
Dokumentace:	Katalogový list

*Souprava magnetoindukčního průtokoměru*

Označení ve schématu:	SQ
Snímač:	IFS 4000
Světlost/tlak	DN 300/PN 10
Krytí:	IP 67
Výstelka:	Neopren
Teplotní odolnost výstelky	Max. 60 °C
Výrobní číslo:	A 92 12740
Převodník:	SC 100 AS
Zobrazení veličin	LCD displej
Rozsah:	$Q_{\max} = 500 \text{ l s}^{-1}$
Přesnost:	±0,2 % z měřené hodnoty pro $v \geq 1 \text{ ms}^{-1}$
Výstup:	0-20 mA
Napájení:	230 V +10/-15 %, 45-63 Hz
Krytí:	IP 65
Výrobní číslo:	A 92 12740
Výrobce soupravy:	KROHNE – Netherlands
Dokumentace:	Uživatelský manuál

*Napájecí zdroj*

Označení ve schématu:	NZ
Typ:	BK 123
Rozsah výstupního napětí:	0-20 V <sub>SS</sub> (2x)
Maximální zatěžovací proud:	1 A
Výrobní číslo:	921871
Výrobce:	TESLA BRNO
Dokumentace:	Katalogový list

*Karta unifikace měřených signálů*

Označení ve schématu:	KU
Typ:	PCLD-780
Počet vstupů:	2x10 galvanicky oddělených
Připojení vstupů:	Šroubovací svorkovnice
Připojení výstupů:	2x20žilový plochý kabel
Rozměry:	10,16 cm x 11,43 cm
Výrobce:	ADVANTECH CO., LTD
Dokumentace:	Katalogový list

*Řídící počítač*

Označení ve schématu:	PC
Typ:	IP LITE 386 SX/16 MHz
Měřicí karta:	PCL 812-PG
Max. chyba A/D převodníku:	±0,015 % z měřené hodnoty + 1 digit
Výrobce:	KONTRON
Dokumentace:	Uživatelský manuál

Převzato z [3]

## 2.4 Měřicí software

Pro měření byl využit uživatelský program vyvinutý na VUT v Brně, podporovaný měřicím programem INMES 812 verze 911127, číslo licence pro VUT Brno FS, OHK V. K. – 1A0039. [3]

## 2.5 Měření tlaku

Při měření turbíny se určuje čistý spád  $H$ , což je manometrická tlaková výška vycházející z rozdílu tlaku na vstupu do turbíny a na konci sací trouby. Lze jej vyjádřit z Bernoulliho rovnice pro nenulový průtok. [4]

$$H = \frac{p_1 - p_2}{\rho \cdot g} + \frac{c_1^2 - c_2^2}{2 \cdot g} + h_1 - h_2 \quad (2.1)$$

Kde  $H$  je čistý spád [m]

$p_1$  je tlak před vstupem do turbíny (v bodě „1“) [Pa]

$p_2$  je tlak na konci savky (v bodě „2“) [Pa]

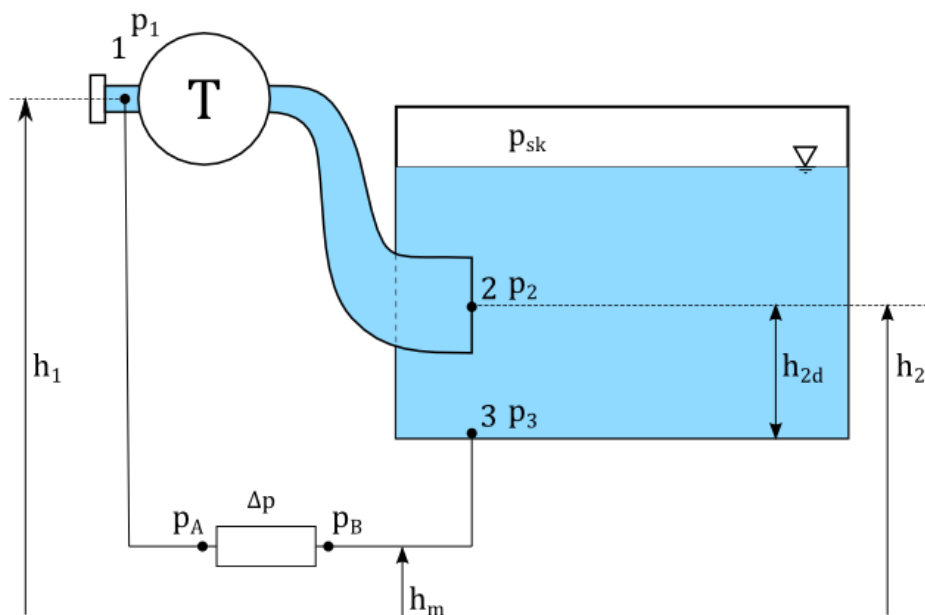
$\rho$  je hustota kapaliny (vody) [kgm<sup>-3</sup>]

$g$  je gravitační zrychlení [ms<sup>-2</sup>]

$c_1, c_2$  jsou rychlosti v bodech „1“ a „2“ [ms<sup>-1</sup>]

$h_1, h_2$  jsou geodetické výšky v bodech „1“ a „2“ [m]

Umístění čidla tlaku na konec sací trouby je však velmi komplikované, proto se používá (a při měření bylo použito) řešení s umístěním druhého čidla tlaku na dně sacího kotle viz obrázek 5. Pro zjednodušení jsou zanedbány ztráty mezi místem měření tlaku  $p_1$  a vstupem do turbíny.



Obrázek 5: Popis obrázku – obrázek provizorní

Hodnoty tlaků na vstupech do diferenciálního snímače tlaku ( $p_A$  a  $p_B$ ) lze vyjádřit pomocí tlaků v odběrných místech a tlaku hydrostatického, jak vyjadřují následující vztahy:

$$p_A = p_1 + \rho \cdot g(h_1 - h_m) \quad (2.2)$$

$$p_B = p_3 + \rho \cdot g(h_2 - h_{2d} - h_m) \quad (2.3)$$

Také tlak v bodě 3 je možné vyjádřit pomocí tlaku v jiném místě sacího kotle a hydrostatického tlaku, jelikož sací kotel lze považovat za rozlehlou nádrž a součinitel výtokové ztráty na konci sací trouby je uvažován  $\xi = 1$ .

$$p_3 = p_{SK} + \rho \cdot g(h_{2d} + h_{2h}) = p_2 + \rho \cdot g \cdot h_{2d} \quad (2.4)$$

Po dosazení za  $p_3$  ze vztahu (2.4) do rovnice (2.3) dostáváme

$$p_B = p_2 + \rho \cdot g(h_{2d} + h_2 - h_{2d} - h_m) = p_2 + \rho \cdot g(h_2 - h_m) \quad (2.5)$$

Tudíž

$$\begin{aligned} \frac{\Delta p}{\rho \cdot g} &= \frac{p_A - p_B}{\rho \cdot g} = \frac{p_1}{\rho \cdot g} + h_{h1} - h_m - \left( \frac{p_2}{\rho \cdot g} - h_2 - h_m \right) = \\ &= \frac{p_1 - p_2}{\rho \cdot g} + h_1 - h_2 \end{aligned} \quad (2.6)$$

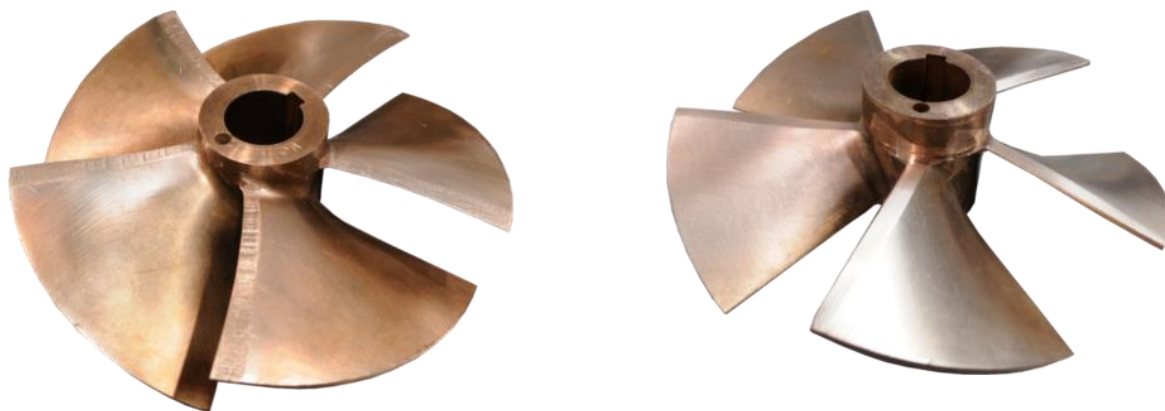
Pokud porovnáme rovnice (2.6) a (2.1) je patrné, že pro určení čistého spádu lze použít přímo hodnoty z diferenciálního tlakoměru, který má jeden odběr na vstupu do turbíny a druhý na dně sacího kotle.

$$H = \frac{\Delta p}{\rho \cdot g} + \frac{c_1^2 - c_2^2}{2 \cdot g} \quad (2.7)$$

## 2.6 Měření varianty modelové turbíny

Měřená modelová vírová turbína 5VT200 profil 3, jejíž hydraulický návrh je uložen v elektronické podobě na Ústavu fluidního inženýrství Viktora Kaplana, Fakulty strojní Vysokého učení technického v Brně, byla měřena v 8 variantách, kdy postupně docházelo ke zkracování délky lopatky oběžného kola obráběním. Materiál byl nejprve ubírán z odtokové hrany vždy tak, že po odebrání se zkrátil průmět lopatky do osy oběžného kola o 3 mm. Po každém

zkrácení lopatky byla turbína podrobena dvěma sériím měření na spádech 3 a 4 m. Na základě naměřených údajů bylo po 5. zkrácení ukončeno odebírání materiálu ze strany odtokové hrany a další zkracování lopatky probíhalo naopak ze strany hrany náběžné. Délka lopatky byla celkem zkrácena 7krát, čímž vzniklo spolu s původní variantou 8 měřených variant.



Obrázek 6: Oběžné kolo po prvním zkrácení - varianta 2 (vlevo) a po pátém zkrácení - varianta 6 (vpravo)

## 2.7 Hustota vody dle ČSN EN 60193

Norma ČSN EN 60193 pro vodní turbíny, akumulární čerpadla a čerpadlové turbíny – Přejímací zkoušky na modelu udává empirické rovnice dle Webera pro numerický výpočet měrného objemu vody  $v_0$  [ $\text{m}^3\text{kg}^{-1}$ ]. Vypočtené hodnoty jsou platné v rozsahu teplot do 35 °C a tlaku do 15 MPa. [5]

$$v = \frac{1}{\rho} = v_0 \cdot [(1 - A \cdot p) + 8 \cdot 10^{-6} \cdot (T - B + C \cdot p)^2 - 6 \cdot 10^{-8} \cdot (T - B - C \cdot p)^3]$$

$$A = 4,6699 \cdot 10^{-10}$$

$$B = 4,0$$

$$C = 2,1318913 \cdot 10^{-7}$$
(2.8)

Kde  $A$ ,  $B$ ,  $C$  jsou zadané konstanty [1]

$p$  je absolutní tlak [Pa]

$T$  je teplota vody [°C]

Výše uvedenou rovnici lze pro hustoty přepsat do tvaru

$$\rho = \frac{1}{v_0 \cdot [(1 - A \cdot p) + 8 \cdot 10^{-6} \cdot (T - B + C \cdot p)^2 - 6 \cdot 10^{-8} \cdot (T - B - C \cdot p)^3]} \quad (2.9)$$

Za tlak  $p$  byl dosazen střední absolutní tlak vypočtený aritmetickým průměrem z hodnot absolutních tlaků naměřených před vstupem do oběžného kola turbíny a na dně sacího kotle (body „1“ a „2“).

$$p = \frac{p_1 + p_2}{2} \quad (2.10)$$

## 2.8 Kinematická viskozita dle ČSN EN 60193

Stejná norma, jako ta použitá pro výpočet hustoty vody, udává vztahy pro výpočet kinematické viskozity  $\nu$  [ $\text{m}^2\text{s}^{-1}$ ] vody závisující na její teplotě a absolutním tlaku. Avšak z praktických

důvodů se pro hydraulické stroje může počítat i s přibližnou hodnotou kinematické viskozity pomocí vzorce zanedbávajícího vliv tlaku. [5]

$$\nu = e^{-16,921 + \frac{396,13}{107,41 + T}} \quad (2.11)$$

Kde  $T$  = teplota v °C

Při použití této rovnice je průměrná odchylka od standardních hodnot  $\pm 0,05$  % až  $\pm 0,09$  %.

## 2.9 Reynoldsovo číslo $Re$

Podobnostní Reynoldsovo číslo, vyjadřující vliv vnitřního tření v důsledku viskozity dané kapaliny při proudění, vyjadřuje vztah [6]

$$Re = \frac{v_s \cdot D_1}{\nu} = \frac{\frac{Q}{S} \cdot D_1}{\nu} = \frac{4 \cdot Q}{\pi \cdot D_1 \cdot \nu} \quad (2.12)$$

Kde  $v_s$  je střední rychlost v profilu  $v$  [ $\text{ms}^{-1}$ ]

$D_1$  je průměr průtočného profilu  $v$  [m]

$\nu$  je kinematická viskozita  $v$  [ $\text{m}^2\text{s}^{-1}$ ]

## 2.10 Ztrátový součinitel $\lambda$ dle Konakova

Pro výpočet ztrát v potrubí, mezi místem měření tlaku  $p_1$  a samotným kolem modelové turbíny, bylo třeba zjistit součinitel délkových ztrát  $\lambda$ . Pro výpočet byl použit vztah podle Konakova [6]

$$\lambda = \frac{1,8}{\log(Re - 1,5)^2} \quad (2.13)$$

Kde  $Re$  je podobnostní Reynoldsovo číslo [1]

## 2.11 Skutečný kroutící moment na hřídeli turbíny

Skutečný kroutící moment na hřídeli se liší od měřeného kroutícího momentu. Je to dáno účinností převodu způsobenou především třením. Skutečný kroutící moment je tedy vyšší než měřený, viz následující vztah.

$$M_{K_{skut}} = \frac{M_{k_{měř}}}{\varepsilon \cdot 100} \quad (2.14)$$

Kde  $\varepsilon$  značí účinnost převodu [1]

Pro vyjádření skutečného kroutícího momentu tedy bylo nutné nejdříve určit účinnost převodu. Při dříve provedené kalibraci převodu byly stanoveny následující vztahy vyjadřující hodnotu účinnosti převodu  $\varepsilon$  pro dvojí rozmezí hodnot naměřeného kroutícího momentu.

Pro  $M_{k_{měř}} > 0,1$  [Nm]

$$\varepsilon = 2,674 + (n - 1500) \cdot 0,001710625 \ln(M_{k_{měř}}) + 85,112 - (n - 1500) \cdot 0,0062925 \quad (2.15)$$

A pro  $M_{k_{měř}} \leq 0,1$  [Nm]

$$\varepsilon = [2,674 + (n - 1500) \cdot 0,001710625] \cdot \ln(0,1) + 85,112 - (n - 1500) \cdot 0,0062925 \quad (2.16)$$

Kde  $n$  jsou měřené otáčky  $v$  [ $\text{min}^{-1}$ ]

## 2.12 Měrná energie zpracovávaná turbínou

Měrná energie byla určována pomocí hodnot měřeného tlaku před oběžným kolem turbíny a na dně sacího kotle. Protože by mohlo docházet k ovlivnění výsledků měření tlaku  $p_1$  rotací kapaliny způsobované oběžným kolem turbíny, byl snímač tlaku  $p_1$  umístěn do vzdálenosti  $l$  před samotné oběžné kolo turbíny. V souladu s normou ČSN EN 60193. [5]

Na tomto úseku dochází ke ztrátě měrné energie či tlaku, které však nemají přímou souvislost s prací turbíny a disipovaná energie nemůže být započítávána do energie zpracované samotnou turbínou. Změnu měrné energie vyjadřuje Bernoulliho rovnice pro nenulový průtok. [4]

$$\Delta Y = Y_1 - Y_2 - Y_z \quad (2.17)$$

Kde  $Y_1, Y_2$  jsou měrné energie v bodech „1“ a „2“ [ $\text{Jkg}^{-1}$ ]

$Y_z$  je ztrátová měrná energie částí potrubí mezi bodem 1 a vstupem do turbíny [ $\text{Jkg}^{-1}$ ]

$\Delta Y$  je energie zpracovávaná turbínou [ $\text{Jkg}^{-1}$ ]

Mezi místem měření tlaku  $p_1$  a vstupem do turbíny tedy dochází k energetické ztrátě. Jelikož jde o úsek skládající se z přímého potrubí o konstantním vnitřním průměru ( $D_1$ ), bylo možno uvažovat ztrátu v přímém úseku potrubí, vyjádřitelnou pomocí vztahu pro ztrátovou měrnou energii,  $Y_z$  [ $\text{Jkg}^{-1}$ ]. [4]

$$Y_z = \lambda \cdot \frac{l}{D_1} \cdot \frac{v^2}{2} \quad (2.18)$$

Kde  $\rho$  je hustota kapaliny [ $\text{kgm}^{-3}$ ]

$\lambda$  je ztrátový součinitel [1]

$l$  je délka potrubí [m]

$D_1$  je průměr potrubí [m]

$v$  je střední rychlost kapaliny v potrubí [ $\text{ms}^{-1}$ ]

Vynásobením rovnice (2.18) hustotou  $\rho$  lze určit ztrátový tlak  $p_z$  [Pa]

$$p_z = \rho \cdot \lambda \cdot \frac{l}{D_1} \cdot \frac{v^2}{2} = \rho \cdot \lambda \cdot \frac{8 \cdot l \cdot Q^2}{\pi^2 \cdot D_1^5} \quad (2.19)$$

Zbývající část měrné energie udává měrnou energii zpracovávanou turbínou a lze ji vyjádřit z Bernoulliho rovnice pro nenulový průtok

$$Y = \frac{\Delta p - p_z}{\rho} + \frac{v_1^2 - v_2^2}{2} = \frac{\Delta p - p_z}{\rho} + Q^2 \cdot \left( \frac{1}{S_1^2} - \frac{1}{S_2^2} \right) \quad (2.20)$$

## 2.13 Účinnost modelové turbíny

Díky znalosti účinnosti převodu a tím i krouťícího momentu vytvářeného přímo oběžným kolem, lze vyjádřit hydraulickou účinnost z následujícího vztahu [4]

$$\eta_h = \frac{M_{kskut} \cdot \omega}{\rho \cdot Q \cdot Y} = \frac{M_{kskut} \cdot 2 \cdot \pi \cdot n}{\rho \cdot Q \cdot Y} \quad (2.21)$$

Kde  $\eta_h$  je hydraulická účinnost [1]

$M_{kskut}$  je skutečný moment na hřídeli turbíny [Nm]

$\omega$  je úhlová rychlost [ $\text{rads}^{-1}$ ]

$n$  jsou otáčky [ $\text{min}^{-1}$ ]

### 3 Charakteristika modelové vírové turbíny 5VT200

Aby byly mezi sebou charakteristiky modelu a prototypu porovnatelné, používají se v nich jednotkové veličiny – jednotkový průtok  $Q_{11}$  [ $\text{m}^3\text{s}^{-1}$ ] a jednotkové otáčky  $n_{11}$  [ $\text{min}^{-1}$ ]. Jedná se o hodnoty přepočítané pomocí afinních vztahů na stroj s průměrem oběžného kola 1 m při spádu 1 m. [6]

Podobnostní vztah pro výpočet jednotkového průtoku  $Q_{11}$  [ $\text{m}^3\text{s}^{-1}$ ]

$$Q_{11} = \frac{Q}{D^2 \cdot \sqrt{H}} = \frac{Q}{D^2 \cdot \sqrt{\frac{Y}{g}}} \quad (3.1)$$

A podobnostní vztah pro výpočet jednotkových otáček  $n_{11}$  [ $\text{min}^{-1}$ ]

$$n_{11} = \frac{n \cdot D}{\sqrt{H}} = \frac{n \cdot D}{\sqrt{\frac{Y}{g}}} \quad (3.2)$$

Kde  $Q$  je měřený průtok [ $\text{m}^3\text{s}^{-1}$ ]

$n$  jsou naměřené otáčky [ $\text{min}^{-1}$ ]

$D$  je průměr oběžného kola modelové turbíny [m]

$H$  je spád na turbínu [m]

$Y$  je měrná energie zpracovávaná turbínou [ $\text{Jkg}^{-1}$ ]

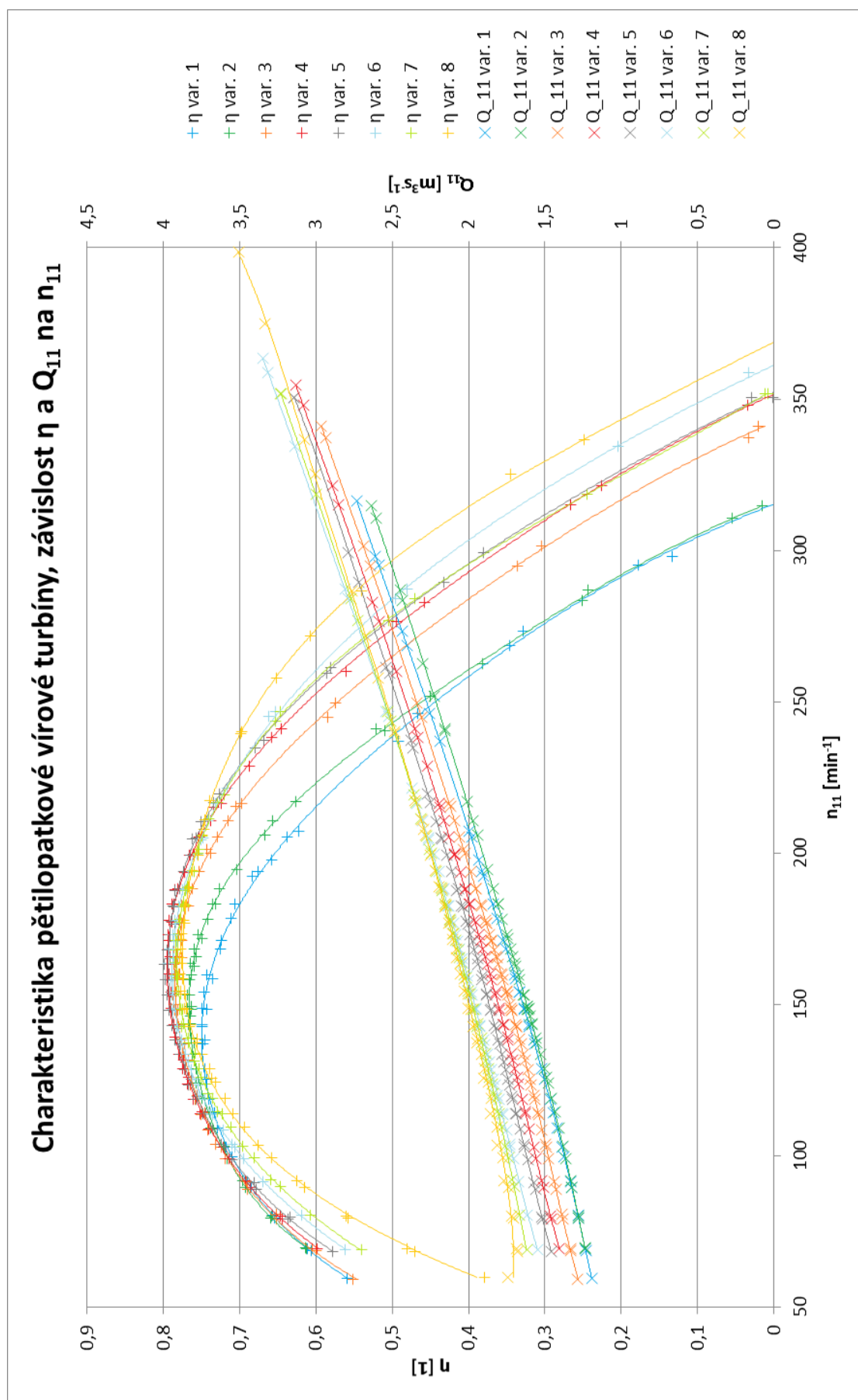
$g$  je gravitační zrychlení [ $\text{ms}^{-1}$ ]

Přepočtením naměřených hodnot pomocí vztahů (3.1) a (3.2) a zakreslením výsledných hodnot vznikla charakteristika modelové vírové turbíny 5VT200 viz graf 1<sup>1</sup>.

---

<sup>1</sup> V celém dokumentu je pracováno pouze s hydraulickou účinností, proto je v grafech vynechán index  $\eta$

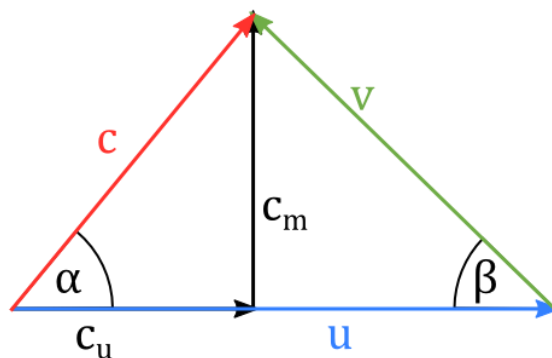




Graf 1: Charakteristika turbíny 5VT200 pro různé varianty délky lopatky

## 4 Rychlostní diagramy pro oběžné kolo

Pro znázornění proudění na vstupu a výstupu z oběžného kola se užívá rychlostních diagramů (trojúhelníků) znázorňujících složky výsledné (absolutní) rychlosti kapaliny. Standardně jsou uvažovány dva souřadné systémy a k nim vztažené tři rychlosti. Absolutní rychlost  $c$  [ $\text{ms}^{-1}$ ] je vztažena k souřadnému systému pevně spojenému se zemským povrchem. Relativní rychlost  $v$  [ $\text{ms}^{-1}$ ] je vztažena k rotujícímu kanálu oběžného kola pohybujícímu se unášivou rychlostí  $u$  [ $\text{ms}^{-1}$ ] vztažené ke stejnému souřadnému systému jako absolutní rychlost ( $c$ ). [4]



Obrázek 7: Rychlostní diagram (trojúhelník)

Jak znázorňuje obrázek 7, krom rozložení absolutní rychlosti do směru unášivého ( $u$ ) a relativního ( $v$ ) lze vyjádřit absolutní rychlost i pomocí promítnutí absolutní rychlosti do unášivého ( $c_u$  [ $\text{ms}^{-1}$ ]) a meridiálního ( $c_m$  [ $\text{ms}^{-1}$ ]) směru. Z obrázku 7 dále vyplývá, že meridiální rychlost ( $c_m$ ) je kolmá na rychlost unášivou ( $u$ ). Vychází z daných průtokových poměrů a odpovídá průtočnému profilu v daném místě. [4]

Předmětem zkoumání byly tvary těchto rychlostních diagramů pro různé varianty oběžného kola turbíny 5VT200 (podle délky lopatek) a také pro různé body v charakteristice turbíny. Pro každou variantu byly vykresleny diagramy na vstupu a výstupu z oběžného kola při minimálních jmenovitých otáčkách ( $n_{11min}$ ), maximálních jmenovitých otáčkách ( $n_{11max}$ ) – blízkých průběžným a při maximální účinnosti ( $\eta_{max}$ ).

Pro rozlišení necht' jsou všechny rychlosti (či jejich složky) a úhly na vstupu do oběžného kola označeny indexem 1 a na výstupu z oběžného kola indexem 2.

### 4.1 Unášivá rychlost

Unášivá rychlost  $u$  [ $\text{ms}^{-1}$ ] je přímo úměrná úhlové rychlosti oběžného kola a vzdálenosti od osy otáčení dle vztahu [4], [6]

$$u = \omega \cdot r = 2 \cdot \pi \cdot n \cdot r \quad (4.1)$$

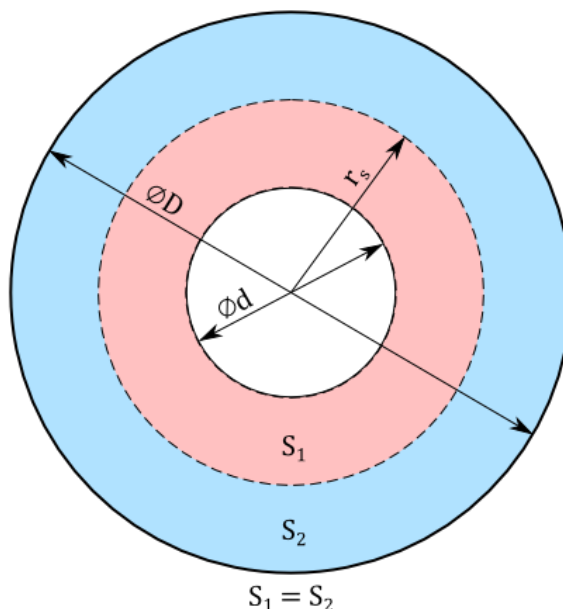
Kde  $\omega$  je úhlová rychlost oběžného kola turbíny [ $\text{rads}^{-1}$ ]

$r$  je kolmá vzdálenost od osy otáčení (poloměr) [m]

$n$  jsou otáčky oběžného kola turbíny [ $\text{s}^{-1}$ ]

Hodnota unášivé rychlosti ( $u$ ) se mění s kolmou vzdáleností od osy otáčení. Je tedy pro účely vykreslení rychlostních diagramů vhodné zvolit její střední hodnotu. Protékanou oblast mezi nábojem oběžného kola turbíny a stěnou potrubí tvoří dutý válec a průtočný profil je tedy tvořen mezikružím. Je zřejmé, že kolmá vzdálenost ( $r_s$ ) dosazovaná za kolmou vzdálenost ( $r$ )

do rovnice (4.1) pro hodnotu střední rychlosti ( $u$ ) bude ležet mezi hodnotami poloměrů dvou kruhů tvořícími výše zmíněné mezikruží. Pro určení této vzdálenosti ( $r_s$ ) bylo uvažováno kritérium rovnoměrného rozdělení průtočného profilu – při vykreslení kružnice o poloměru stejném, jako je poloměr střední unášivé rychlosti, dojde k rozdělení mezikruží tak, že obě mezikruží budou mít stejnou plochu.



Obrázek 8: Rozdělení průtočného profilu

Hledaný poloměr  $r_s$  [m] je poté určen vztahem:

$$r_s = \sqrt{\frac{D^2 - d^2}{2}} \quad (4.2)$$

Kde  $D$  je vnitřní průměr potrubí v místě oběžného kola [m]

$d$  je průměr náboje oběžného kola [m]

Vírová turbína má stejně jako např. turbína Kaplanova stejný průtočný profil na vstupu i výstupu, což znamená, že hodnoty střední unášivé rychlosti na obou stranách oběžného kola si při uvažování stejného kritéria budou rovný.

$$u_1 = u_2 = 2 \cdot \pi \cdot n \cdot \sqrt{\frac{D^2 - d^2}{2}} \quad (4.3)$$

Kde  $u_1$  je hodnota střední unášivé rychlosti na vstupu do oběžného kola turbíny [ $\text{ms}^{-1}$ ]

$u_2$  je hodnota střední unášivé rychlosti na výstupu z oběžného kola turbíny [ $\text{ms}^{-1}$ ]

$n$  jsou otáčky oběžného kola turbíny [ $\text{s}^{-1}$ ]

$D$  je vnitřní průměr potrubí v místě oběžného kola [m]

$d$  je průměr náboje oběžného kola [m]

#### 4.2 Meridiální složka absolutní rychlosti

Meridiální složka absolutní rychlosti  $c_m$  [ $\text{ms}^{-1}$ ] je oproti tomu přímo úměrná průtoku a nepřímo úměrná ploše průtočného profilu v místě jejího určování, jak popisuje vztah [4], [6]

$$c_m = \frac{Q}{S} = \frac{4 \cdot Q}{\pi(D^2 - d^2)} \quad (4.4)$$

Kde  $Q$  je průtok [ $\text{m}^3\text{s}^{-1}$ ]

$S$  je plocha průtočného profilu [ $\text{m}^2$ ]

$D$  je vnitřní průměr potrubí v místě oběžného kola [m]

$d$  je průměr náboje oběžného kola [m]

Jak již bylo uvedeno při odvozování rovnice (4.3), vírová turbína má průtočný profil stejný na vstupu i výstupu z oběžného kola, a tudíž jsou stejné i plochy těchto profilů. S přihlédnutím k rovnici kontinuity a uvažováním stlačitelnosti použité kapaliny (vody) za nevýznamně malou, lze uvažovat hodnoty meridiální složky rychlosti na vstupu i výstupu z oběžného kola za sobě si rovné [4], [6]:

$$c_{m1} = c_{m2} = \frac{4 \cdot Q}{\pi(D^2 - d^2)} \quad (4.5)$$

Kde  $c_{m1}$  je meridiální složka absolutní rychlosti na vstupu do oběžného kola turbíny [ $\text{ms}^{-1}$ ]

$c_{m2}$  je meridiální složka absolutní rychlosti na výstupu z oběžného kola turbíny [ $\text{ms}^{-1}$ ]

$Q$  je průtok [ $\text{m}^3\text{s}^{-1}$ ]

$D$  je vnitřní průměr potrubí v místě oběžného kola [m]

$d$  je průměr náboje oběžného kola [m]

### 4.3 Rychlosti na vstupu do oběžného kola

#### 4.3.1 Unášivá rychlost

Je závislá pouze na úhlové rychlosti (otáčkách) modelové turbíny. Vztah pro určení její hodnoty je dán rovnicí (4.3).

#### 4.3.2 Meridiální složka absolutní rychlosti

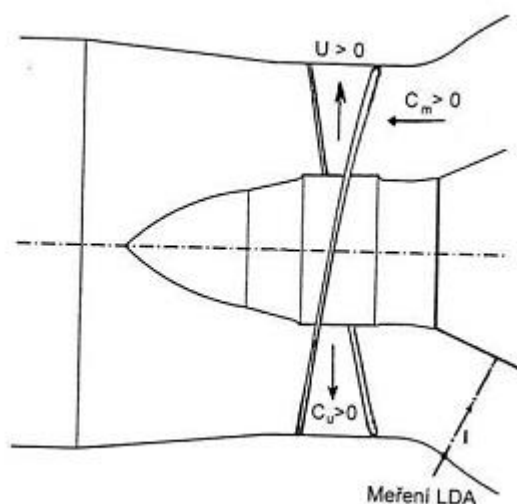
Stejně jako unášivou rychlost je možné její hodnotu určit přímo z měřených hodnot a znalosti plochy průtočného profilu dle vztahu (4.4).

#### 4.3.3 Určení vstupního úhlu $\alpha_1$

Unášivá a meridiální složka rychlosti jsou jediné dvě složky rychlosti, které je možné zjistit přímo z měřených veličin. Ovšem pro určení rychlostního trojúhelníka je nutné znát alespoň tři jeho parametry. V případě turbíny 5VT200 bylo přistoupeno k zjištění úhlu ( $\alpha_1$ ) mezi absolutní rychlostí ( $c_1$ ) a rychlostí v unášivém směru ( $u_1$ ).

Pro určení úhlu  $\alpha_1$  bylo využito výsledků měření z roku 2000, které zkoumalo charakter proudění v blízkosti oběžného kola metodou LDA a probíhalo ve stejném prostoru (před turbínou), v jakém byla měřena modelová vírová turbína 5VT200. Toto měření potvrdilo existenci předrotace kapaliny před oběžným kolem, která nebyla závislá na otáčkách či přítomnosti samotného oběžného kola. [7]

Měření proběhlo před oběžným kolem v místech, kde je průtočný profil mírně odlišný od průtočného profilu přímo na vstupu do oběžného kola, viz obrázek 9.



Obrázek 9: Měření LDA před oběžným kolem; převzato z (7)

Z obrázku 9 je patrné, že měření probíhalo na souřadnici  $l$ , která není kolmá na osu otáčení oběžného kola turbíny. Tato souřadnice souvisela s poloměrem  $r$  [m] dle následujícího vztahu. [7]

$$r = [103 - l \cdot \cos(14^\circ)] \cdot 10^{-3} \quad (4.6)$$

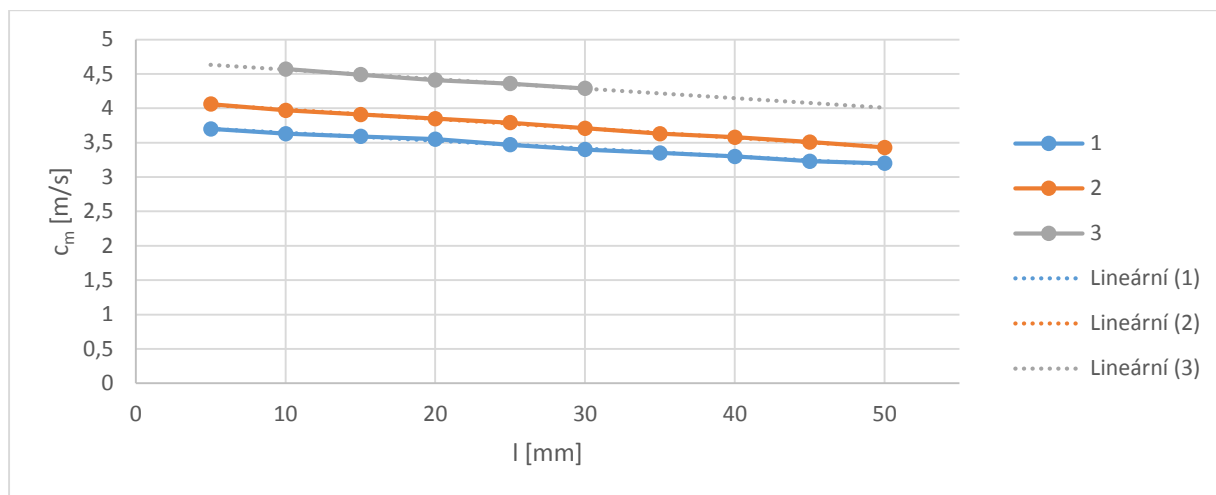
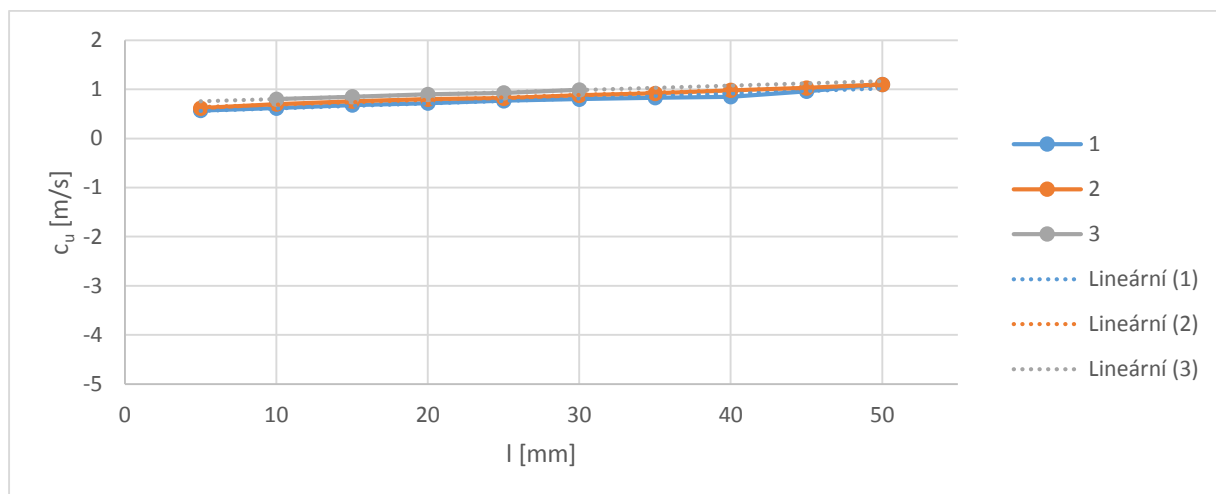
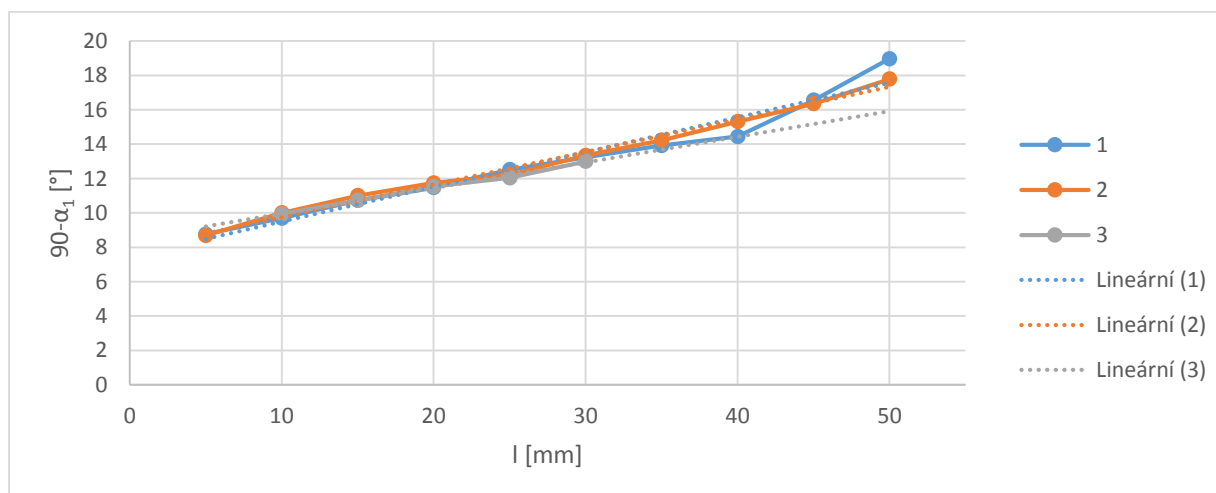
Kde  $r$  je kolmá vzdálenost od osy otáčení oběžného kola (poloměr) [m]

$l$  je souřadnice užívaná při měření metodou LDA [mm]

Po přepočtu dle vztahu (4.6) není nutné provádět další korekce, protože lze předpokládat, že se úhel mezi rychlostmi nemění. [7] Výstupem měření byly grafické závislosti meridiální složky absolutní rychlosti, unášivé rychlosti a úhlu mezi meridiální složkou a samotnou absolutní rychlostí – vyjádřitelným jako  $(90 - \alpha_1)$  – na souřadnici  $l$  pro několik režimů.

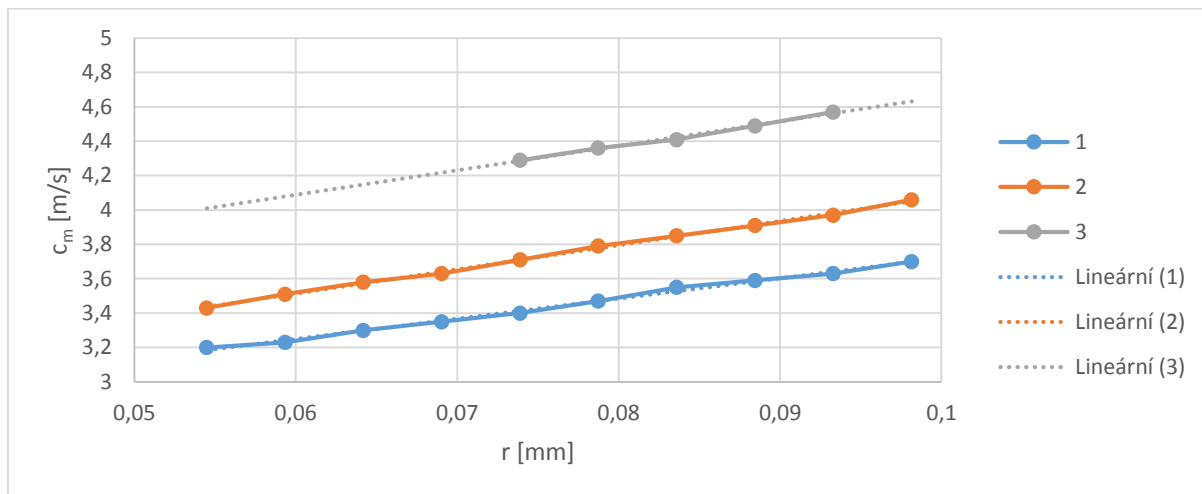
1. Optimum stroje
2. Návrhový bod
3. Průběh stroje

Z výsledků měření vychází, že hodnoty unášivé ( $c_{u1}$ ) i meridiální složky absolutní rychlosti ( $c_{m1}$ ) v prostoru před oběžným kolem se mění v závislosti na souřadnici  $l$  a tato závislost je lineární viz grafy [7].

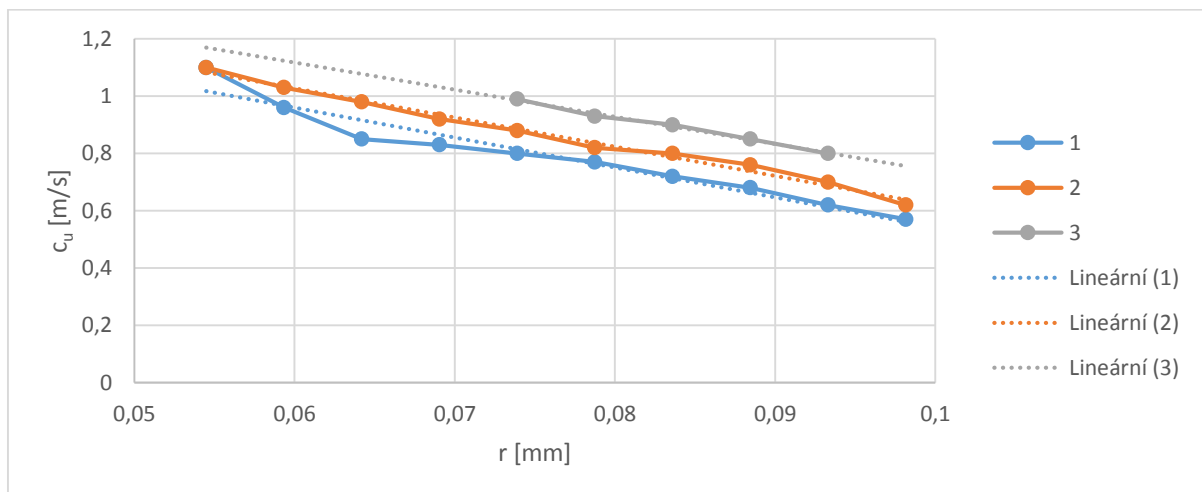
Graf 2: Závislost meridiální složky absolutní rychlosti na souřadnici  $l$  [7]Graf 3: Závislost unášívé složky absolutní rychlosti na souřadnici  $l$  [7]

Graf 4: Závislost velikosti úhlu mezi absolutní a unášívou rychlostí [7]

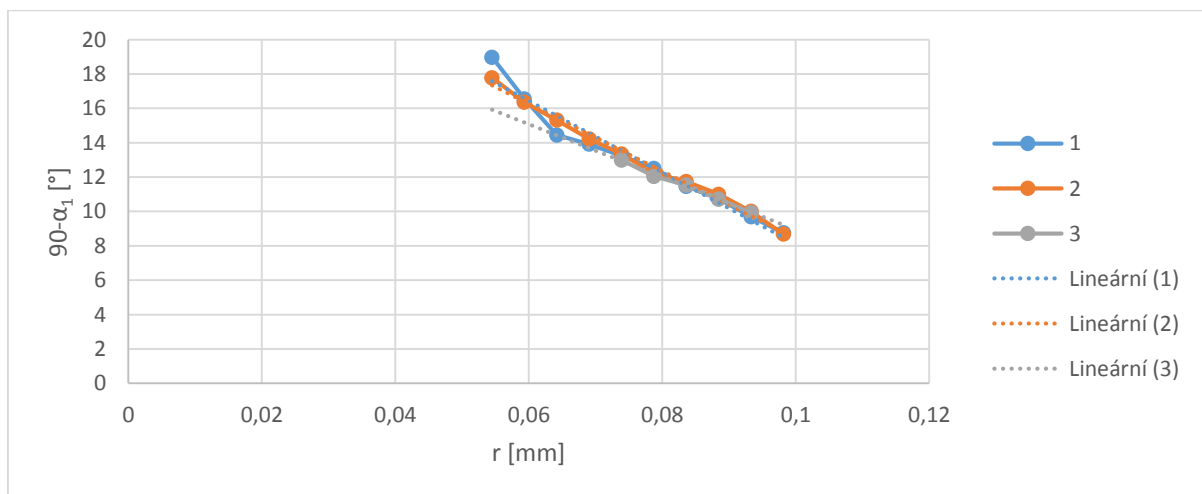
Stejně tak jsou obě složky absolutní rychlosti lineárně závislé na poloměru  $r$  přepočteného podle vztahu (4.6).



Graf 5: Závislost meridiální složky absolutní rychlosti na poloměru  $r$



Graf 6: Závislost složky absolutní rychlosti do unášivého směru na poloměru  $r$



Graf 7: Závislost úhlu  $\alpha$  mezi unášivou a absolutní rychlostí na souřadnici  $r$

Platí, že úhel  $\alpha_1$  [°] je závislý na velikosti unášivé a meridiální složky absolutní rychlosti dle vztahu [6]

$$\alpha_1 = \arctg\left(\frac{c_{m1}}{c_{u1}}\right) \quad (4.7)$$

Kde  $c_{m1}$  je meridiální složka absolutní rychlosti na vstupu do oběžného kola [ $\text{ms}^{-1}$ ]

$c_{u1}$  je složka absolutní rychlosti v unášivém směru na vstupu do oběžného kola [ $\text{ms}^{-1}$ ]

Pro výpočet střední hodnoty úhlu  $\alpha_1$  byl využit předpoklad zachování momentu hybnosti kapaliny  $L$  na vstupu do oběžného kola. Pro moment hybnosti platí vztah [8]

$$L = \vec{r} \times \vec{p} = \vec{r} \times (m \cdot \vec{v}) \quad (4.8)$$

Kde  $L$  je moment hybnosti [ $\text{kgm}^2\text{s}^{-1}$ ]

$\vec{r}$  je polohový vektor [m]

$\vec{p}$  je vektor hybnosti [ $\text{kgms}^{-1}$ ]

$m$  je hmotnost [kg]

$\vec{v}$  je vektor rychlosti [ $\text{ms}^{-1}$ ]

Do vztahu (4.8) lze dosadit za polohový vektor ( $\vec{r}$ ) kolmou vzdálenost od osy rotace oběžného kola  $r$  a za vektor rychlosti ( $\vec{v}$ ) vektor absolutní rychlosti ( $\vec{c}$ ) ve vyšetřovaném průřezu. Díky vektorovému součinu se však projeví pouze unášivá složka absolutní rychlosti.

$$\vec{r} \times (m \cdot \vec{v}) = \vec{r} \times (m \cdot \vec{c}) = r \cdot m \cdot c_{u1} \quad (4.9)$$

Kde  $\vec{r}$  je polohový vektor [m]

$m$  je hmotnost [kg]

$\vec{v}$  je vektor rychlosti [ $\text{ms}^{-1}$ ]

$\vec{c}$  je vektor absolutní rychlosti [ $\text{ms}^{-1}$ ]

$r$  je kolmá vzdálenost od osy otáčení oběžného kola (poloměr) [m]

$c_{u1}$  je složka absolutní rychlosti v unášivém směru na vstupu do oběžného kola [ $\text{ms}^{-1}$ ]

Za hmotnost ( $m$ ) lze potom dosadit hmotnostní tok  $\dot{m}$  [ $\text{kgs}^{-1}$ ] vyjádřený vztahem:

$$\dot{m} = Q \cdot \rho = c_m \cdot S \cdot \rho \quad (4.10)$$

Kde  $\dot{m}$  je hmotnostní tok [ $\text{kgs}^{-1}$ ]

$Q$  je průtok v průřezu [ $\text{m}^3\text{s}^{-1}$ ]

$S$  je plocha průřezu [ $\text{m}^2$ ]

$\rho$  je hustota kapaliny [ $\text{kgm}^{-3}$ ]

Pokud z rovnic (4.9) a (4.10) dosadíme do vztahu (4.7) získáme rovnici pro tok elementárního momentu hybnosti  $d\dot{L}$  kapaliny protékající plochou  $dS$  vzdálené poloměrem  $r$  od osy rotace.

$$d\dot{L} = r \cdot c_m \cdot dS \cdot \rho \cdot c_u \quad (4.11)$$

Kde  $\dot{L}$  je tok momentu hybnosti

$r$  je kolmá vzdálenost od osy otáčení oběžného kola (poloměr) [m]

$c_{m1}$  je meridiální složka absolutní rychlosti na vstupu do oběžného kola [ $\text{ms}^{-1}$ ]

$c_{u1}$  je složka absolutní rychlosti v unášivém směru na vstupu do oběžného kola [ $\text{ms}^{-1}$ ]

$S$  je plocha průřezu [ $\text{m}^2$ ]

$\rho$  je hustota kapaliny [ $\text{kgm}^{-3}$ ]



Jelikož meridiální ( $c_{m1}$ ) i unášivá složka ( $c_{u1}$ ) absolutní rychlosti jsou lineárně závislé na poloměru ( $r$ ), lze naměřené hodnoty proložit přímkou. Rovnice regresní přímky tak bude vyjadřovat složky absolutní rychlosti jako funkce poloměru  $r$ .

$$c_{m1} = A \cdot r + B \quad (4.12)$$

$$c_{u1} = C \cdot r + D \quad (4.13)$$

Kde  $c_{m1}$  je meridiální složka absolutní rychlosti na vstupu do oběžného kola [ $\text{ms}^{-1}$ ]

$c_{u1}$  je unášivá složka absolutní rychlosti na vstupu do oběžného kola [ $\text{ms}^{-1}$ ]

$r$  je kolmá vzdálenost od osy otáčení oběžného kola [m]

$A, B, C, D$  jsou konstanty z rovnice regresní přímky [1]

Díky kruhovému tvaru vyšetřovaného průřezu lze rovnici (4.11) vyjádřit v následujícím tvaru:

$$d\dot{L} = r \cdot c_m \cdot \rho \cdot c_u \cdot dS = \rho \cdot c_{m1} \cdot c_{u1} \cdot r^2 \cdot dr \, d\varphi \quad (4.14)$$

Kde  $d\dot{L}$  je tok momentu hybnosti

$r$  je kolmá vzdálenost od osy otáčení oběžného kola (poloměr) [m]

$c_{m1}$  je meridiální složka absolutní rychlosti na vstupu do oběžného kola [ $\text{ms}^{-1}$ ]

$c_{u1}$  je složka absolutní rychlosti v unášivém směru na vstupu do oběžného kola [ $\text{ms}^{-1}$ ]

$dS$  je plocha průřezu [ $\text{m}^2$ ]

$\rho$  je hustota kapaliny [ $\text{kgm}^{-3}$ ]

$dr, d\varphi$  jsou infinitezimální přírůstky

Po dosazení pravých stran z rovnic (4.12) a (4.13) a následné integraci lze vyjádřit celkový tok momentu hybnosti v kontrolovaném průřezu

$$\dot{L} = \rho \int_0^{2\pi} \int_{\frac{d}{2}}^{\frac{D}{2}} (A \cdot r + B)(C \cdot r + D) \cdot r^2 \cdot dr \, d\varphi \quad (4.15)$$

Kde  $\dot{L}$  je tok momentu hybnosti

$\rho$  je hustota kapaliny [ $\text{kgm}^{-3}$ ]

$D$  je vnitřní průměr potrubí v místě oběžného kola [m]

$d$  je průměr náboje oběžného kola [m]

$A, B, C, D$  jsou konstanty z rovnice regresní přímky [1]

$dr, d\varphi$  jsou infinitezimální přírůstky

Stejně hodnoty hybnostního toku ( $\dot{L}$ ) musí být dosaženo i při jeho vyjádření pomocí středních hodnot složek absolutní rychlosti ( $c_{m1střed}$  a  $c_{u1střed}$ ). Tedy:

$$\dot{L} = \rho \int_0^{2\pi} \int_{\frac{d}{2}}^{\frac{D}{2}} c_{m1stř} \cdot c_{u1stř} \cdot r^2 \cdot dr \, d\varphi \quad (4.16)$$

Kde  $\dot{L}$  je tok momentu hybnosti

$\rho$  je hustota kapaliny [ $\text{kgm}^{-3}$ ]

$c_{m1stř}$  je střední hodnota meridiální složky absolutní rychlosti na vstupu do oběžného kola [ $\text{ms}^{-1}$ ]

$c_{u1stř}$  je střední hodnota unášivé složky absolutní rychlosti na vstupu do oběžného kola [ms<sup>-1</sup>]

$S$  je plocha průřezu [m<sup>2</sup>]

Přičemž střední hodnotu meridiální složky unášivé rychlosti lze vyjádřit jako

$$c_{m1stř} = \frac{Q}{S} = \frac{4 \cdot Q}{\pi(D^2 - d^2)} \quad (4.17)$$

Kde  $c_{m1stř}$  je meridiální složka unášivé rychlosti [ms<sup>-1</sup>]

$Q$  je průtok v průřezu [m<sup>3</sup>s<sup>-1</sup>]

$S$  je plocha průřezu [m<sup>2</sup>]

Tudíž po dosazení ze vztahu (4.17) do (4.16) a integraci lze vyjádřit střední hodnotu unášivé složky absolutní rychlosti jako

$$c_{u1stř} = \frac{6\dot{L}(D^2 - d^2)}{2\rho Q(D^3 - d^3)} \quad (4.18)$$

Kde  $c_{u1stř}$  je střední hodnota unášivé složky absolutní rychlosti na vstupu do oběžného kola [ms<sup>-1</sup>]

$\dot{L}$  je tok momentu hybnosti

$D$  je vnitřní průměr potrubí v místě oběžného kola [m]

$d$  je průměr náboje oběžného kola [m]

$Q$  je průtok v průřezu [m<sup>3</sup>s<sup>-1</sup>]

Po určení středních hodnot výše uvedených složek absolutní rychlosti je možné analogicky se vztahem (4.7) vyjádřit hodnotu středního úhlu ( $\alpha_{1stř}$ ) (6)

$$\alpha_{1stř} = \arctg\left(\frac{c_{m1stř}}{c_{u1stř}}\right) \quad (4.19)$$

Kde  $\alpha_{1stř}$  je střední hodnota úhlu mezi absolutní a unášivou rychlostí [°]

$c_{m1stř}$  je střední hodnota meridiální složky absolutní rychlosti na vstupu do oběžného kola [ms<sup>-1</sup>]

$c_{u1stř}$  je střední hodnota unášivé složky absolutní rychlosti na vstupu do oběžného kola [ms<sup>-1</sup>]

Výsledná střední hodnota úhlu mezi absolutní a unášivou rychlostí ( $\alpha_{1stř}$ ), viz výpočetní sešit, je

$$\alpha_{1stř} = 79,25^\circ \quad (4.20)$$

#### 4.3.4 Průmět absolutní rychlosti do unášivého směru

Absolutní rychlost spolu se svojí meridiální složkou a průmětem do unášivého směru tvoří pravoúhlý trojúhelník, tudíž při znalosti velikosti meridiální rychlosti ( $c_{m1}$ ) a protilehlého úhlu  $\alpha_1$  je možné počítat hodnotu průmětu absolutní rychlosti do unášivého směru ( $c_{u1}$ ) pomocí goniometrických funkcí. [6]

$$c_{u1} = \frac{c_{m1}}{\operatorname{tg}(\alpha_1)} \quad (4.21)$$

Kde  $c_{u1}$  je průmět absolutní rychlosti do unášivého směru na vstupu do OK [ $\text{ms}^{-1}$ ]

$c_{m1}$  je meridiální rychlost  $c_{m1}$  na vstupu do OK [ $\text{ms}^{-1}$ ]

$\alpha_1$  je úhel mezi absolutní rychlostí a jejím průmětem do unášivého směru [ $^\circ$ ]

#### 4.3.5 Absolutní rychlost

Podobně jako průmět absolutní rychlosti do unášivého směru lze pomocí goniometrických funkcí počítat i hodnotu absolutní rychlosti ( $c_1$ ) na vstupu do oběžného kola.

$$c_1 = \frac{c_m}{\sin(\alpha_1)} \quad (4.22)$$

Kde  $c_1$  je absolutní rychlost na vstupu do OK [ $\text{ms}^{-1}$ ]

$c_{m1}$  je meridiální rychlost  $c_{m1}$  na vstupu do OK [ $\text{ms}^{-1}$ ]

$\alpha_1$  je úhel mezi absolutní rychlostí a jejím průmětem do unášivého směru [ $^\circ$ ]

#### 4.3.6 Úhel mezi unášivou a relativní rychlostí

Při znalosti meridiální rychlosti ( $c_{m1}$ ), unášivé rychlosti ( $u$ ) a průmětu unášivé rychlosti do unášivého směru ( $c_{u1}$ ) lze za použití goniometrických funkcí určit hodnotu úhlu mezi unášivou a relativní rychlostí ( $\beta_1$ )

$$\beta_1 = \arctg\left(\frac{c_{m1}}{u_1 - c_{u1}}\right) \quad (4.23)$$

Kde  $\beta_1$  je úhel mezi unášivou a relativní rychlostí na vstupu do OK [ $^\circ$ ]

$c_{m1}$  je meridiální rychlost  $c_{m1}$  na vstupu do OK [ $\text{ms}^{-1}$ ]

$u_1$  je unášivá rychlost na vstupu do OK [ $\text{ms}^{-1}$ ]

$c_{u1}$  je průmět absolutní rychlosti do unášivého směru na vstupu do OK [ $\text{ms}^{-1}$ ]

#### 4.3.7 Relativní rychlost

Se znalostí předešlých hodnot lze určit také hodnotu unášivé rychlosti na vstupu do oběžného kola ( $v_1$ ). (6)

$$v_1 = \frac{c_m}{\sin(\beta_1)} \quad (4.24)$$

Kde  $v_1$  je unášivá rychlost na vstupu do OK [ $\text{ms}^{-1}$ ]

$c_{m1}$  je meridiální rychlost  $c_{m1}$  na vstupu do OK [ $\text{ms}^{-1}$ ]

$\beta_1$  je úhel mezi unášivou a relativní rychlostí na vstupu do OK [ $^\circ$ ]

### 4.4 Rychlosti na výstupu z oběžného kola

#### 4.4.1 Unášivá rychlost

$u_2$  [ $\text{ms}^{-1}$ ] je stejná jako unášivá rychlost na vstupu ( $u_1$ ) dána rovnicí (2.3).

#### 4.4.2 Meridiální složka absolutní rychlosti

$c_{m2}$  [ $\text{ms}^{-1}$ ] je podobně jako unášivá rychlost stejná na vstupu i výstupu z oběžného kola a je definovaná vztahem (4.4).

#### 4.4.3 Průmět absolutní rychlosti do unášivého směru

K výpočtu hodnoty průmětu absolutní rychlosti do unášivého směru byl použit vztah pro krouticí moment [4]

$$M_k = \frac{\rho \cdot Q \cdot Y \cdot \eta}{\omega} \quad (4.25)$$

Kde  $M_k$  je krouticí moment [Nm]

$\rho$  je hustota [ $\text{kgm}^{-3}$ ]

$Q$  je průtok [ $\text{m}^3\text{s}^{-1}$ ]

$Y$  je měrná energie [ $\text{Jkg}^{-1}$ ]

$\omega$  je úhlová rychlost OK [ $\text{rads}^{-1}$ ]

Do rovnice (4.25) můžeme dle Eulerovy turbínové rovnice dosadit [4]

$$Y = \frac{(u_1 c_{u1} - u_2 c_{u2})}{\eta} \quad (4.26)$$

Kde  $u_1, u_2$  jsou unášivé rychlosti na vstupu a výstupu z OK [ $\text{ms}^{-1}$ ]

$c_{u1}, c_{u2}$  jsou průměty absolutní rychlosti do unášivého směru [ $\text{ms}^{-1}$ ]

$\eta$  je účinnost (viz kapitola 2.13) [1]

Unášivou rychlost lze vyjádřit pomocí otáček oběžného kola – dle vztahu (4.1)

$$u = 2\pi nr \quad (4.27)$$

Kde  $n$  jsou otáčky OK [ $\text{s}^{-1}$ ]

$r$  je poloměr pro určení unášivé rychlosti zjištěný pomocí vztahu (4.2)

Dále za úhlovou rychlost lze dosadit

$$\omega = 2\pi n \quad (4.28)$$

Vztah pro krouticí moment po dosazení

$$M_k = r_s \cdot \rho \cdot Q (c_{u1} - c_{u2}) \quad (4.29)$$

Z nějž lze vyjádřit průmět unášivé složky rychlosti na výstupu z oběžného kola jako

$$c_{u2} = c_{u1} - \frac{M_k}{r_s \cdot \rho \cdot Q} \quad (4.30)$$

#### 4.4.4 Výstupní úhel $\alpha_2$

Na rozdíl od vstupu do oběžného kola není na výstupu úhel mezi absolutní a unášivou rychlostí konstantní. Se znalostí předešlých vztahů jej však lze vyjádřit jako

$$\alpha_2 = 90^\circ - \operatorname{arccotg} \left( -\frac{c_{u2}}{c_{m2}} \right) \quad (4.31)$$

Kde  $\alpha_2$  je úhel mezi meridiální složkou absolutní rychlosti a jejím průmětem do unášivého směru na výstupu z OK [ $^\circ$ ]

$c_{m2}$  je hodnota meridiální rychlosti na výstupu z oběžného kola [ $\text{ms}^{-1}$ ]

#### 4.4.5 Absolutní rychlost

Při znalosti meridiální rychlosti a úhlu  $\alpha_2$  je možno vyjádřit absolutní rychlost jako

$$c_2 = \frac{c_{m2}}{\sin(\alpha_2)} \quad (4.32)$$

Kde  $c_2$  je absolutní rychlost na výstupu z OK [ $\text{ms}^{-1}$ ]

#### 4.4.6 Úhel mezi unášivou a relativní rychlostí

Úhel mezi unášivou a relativní rychlostí lze určit pomocí goniometrických funkcí jako na vstupu do oběžného kola, viz vztah (4.23).

$$\beta_2 = \arctg\left(\frac{c_{m2}}{u_2 - c_{u2}}\right) \quad (4.33)$$

Kde  $\beta_2$  je úhel mezi unášivou a relativní rychlostí na výstupu z OK [ $^\circ$ ]

$u_2$  je unášivá rychlost na výstupu z OK [ $\text{ms}^{-1}$ ]

## 5 Q-H diagram vírové turbíny

Při výběru vhodného oběžného kola pro danou lokalitu se používá Q-H diagramů, kde jsou zobrazeny křivky konstantních hodnot jednotlivých parametrů turbíny vypočtené pomocí podobnostních (afinních) vztahů v závislosti na spádu a průtoku.

### 5.1 Průměr oběžného kola

Pokud má turbína při daném průměru oběžného kola pracovat se stejnou účinností jako modelová, je zapotřebí, aby platila rovnice plynoucí ze vztahu pro jednotkový průtok [6]

$$H = \frac{Q^2}{D^4 Q_{11}^2} \quad (5.1)$$

Kde  $H$  je spád [m]

$Q$  je průtok (lokalita) [ $\text{m}^3\text{s}^{-1}$ ]

$D$  je průměr kola [m]

$Q_{11}$  je jednotkový průtok turbíny [ $\text{m}^3\text{s}^{-1}$ ]

### 5.2 Otáčky

Pro dané otáčky platí rovnice vycházející ze vztahu pro jednotkové otáčky [6]

$$H = \sqrt[3]{\left(\frac{n}{n_{11}}\right)^4 \cdot \left(\frac{Q}{Q_{11}}\right)^2} \quad (5.2)$$

Kde  $n$  jsou otáčky (pro lokalitu) [ $\text{min}^{-1}$ ]

$n_{11}$  jsou jednotkové otáčky turbíny [ $\text{min}^{-1}$ ]

### 5.3 Výkon

Pro výkon platí následující rovnice vycházející ze vztahu pro výkon [6]

$$H = \frac{P}{\eta \cdot g \cdot \rho \cdot Q} \quad (5.3)$$

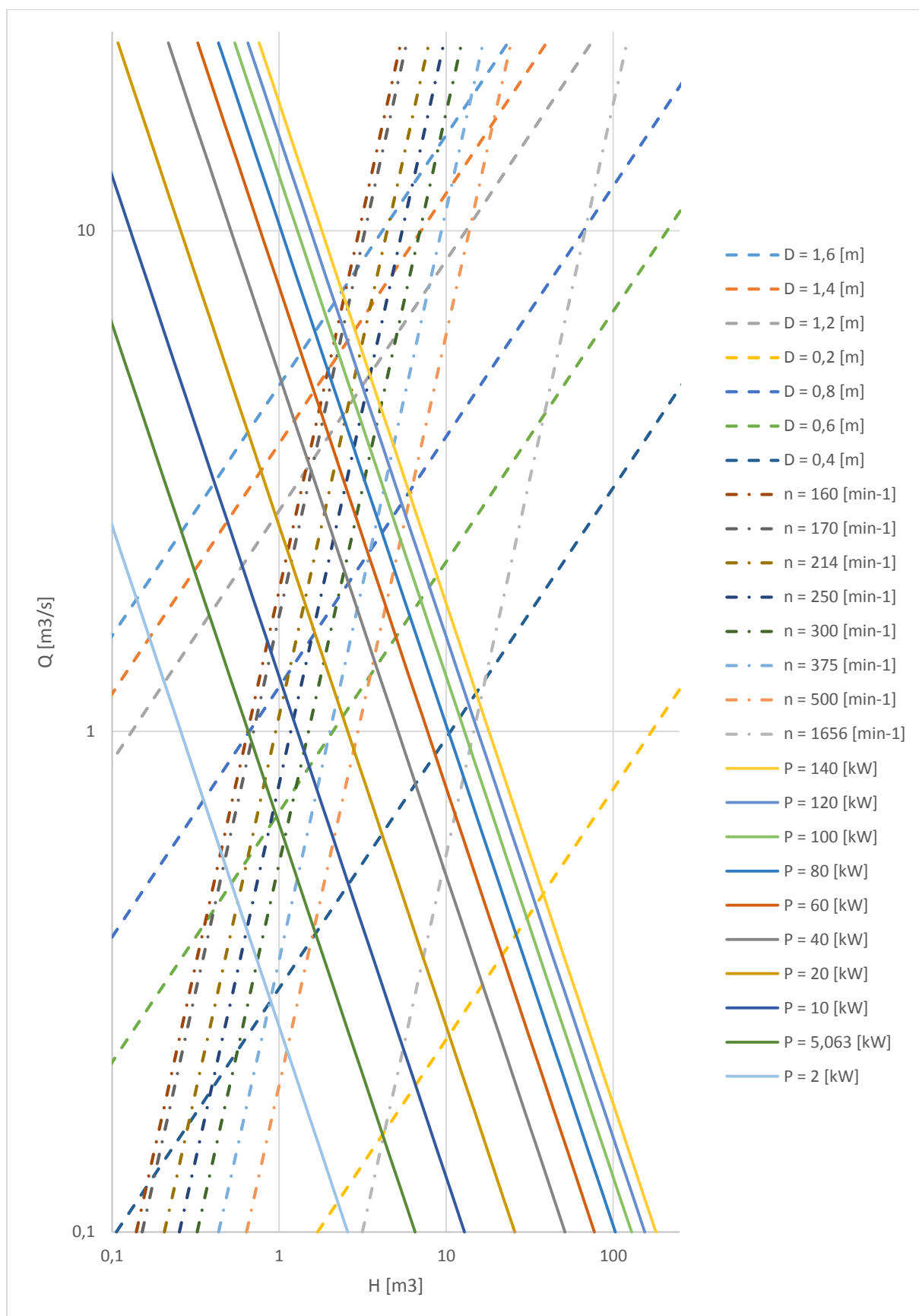
Kde  $P$  je výkon na hřídeli turbíny [W]

$\eta$  je účinnost turbíny [1]

$g$  je gravitační zrychlení [ $\text{ms}^{-2}$ ]

$\rho$  je hustota pracovní kapaliny (vody) [ $\text{kgm}^{-3}$ ]

Pomocí předešlých vztahů byl vykreslen Q-H diagram pro vírovou turbínu ve variantě s nejvyšší účinností (5. varianta). Viz charakteristika vírové turbíny (Graf 1).

Graf 8:  $Q$ - $H$  diagram pro pětílopatovou vírovou turbínu

## 6 Nejistoty

Počítané dle normy ČSN ISO 17025. [9]

### 6.1 Nejistota typu A

Rozšířená nejistota střední hodnoty přímo měřených veličin. Počítána dle vztahu:

$$u_{A(x)} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n \cdot (n - 1)}} \quad (6.1)$$

Vzhledem k velikosti nejistot typu A v porovnání s nejistotami typu B byly nejistoty typu A zanedbány.

### 6.2 Nejistota typu B

Rozšířená nejistota B byla určena pro elektronicky měřené veličiny, které byly následně digitalizovány pomocí AD převodníku, jmenovitě průtok, tlaková diference, krouticí moment a otáčky. Skládá se z nejistoty snímače a AD převodníku. Samotná nejistota AD převodníku je složena z lineární nejistoty a nejistoty kvantováním, což je chyba jednoho digitu.

### 6.3 Nejistota typu B pro průtok

Vyjádřena vztahem:

$$U_B(Q) = \sqrt{(U_B(Q_S))^2 + (U_B(Q_{AD}))^2} \quad (6.2)$$

Kde  $U_B(Q)$  je rozšířená nejistota typu B pro průtok [ $\text{m}^3\text{s}^{-1}$ ]

$U_B(Q_S)$  je rozšířená nejistota typu B průtokoměru [ $\text{m}^3\text{s}^{-1}$ ]

$U_B(Q_{AD})$  je rozšířená nejistota typu B AD převodníku [ $\text{m}^3\text{s}^{-1}$ ]

Rozšířená nejistota ( $U_B(Q_S)$ ) vychází z třídy přesnosti průtokoměru.

Pro  $Q > 0,0707 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$

$$u_B(Q_S) = 0,002 \cdot Q \quad (6.3)$$

Pro  $Q < 0,0707 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$

$$u_B(Q_S) = 0,002 \cdot 0,0707 \quad (6.4)$$

Rozšířená nejistota ( $u_B(Q_{AD})$ ) vychází z nejistoty AD převodníku. Skládá se z nejistoty jednoho digitu a třídy přesnosti měřící karty.

$$u_B(Q_{AD}) = T_P \cdot Q + D \quad (6.5)$$

Kde  $T_P$  je třída přesnosti [1]

$D$  je jeden digit  $D = 0,000255 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$

Třída přesnosti ( $T_P$ ) je 0,015 % z naměřené hodnoty, je nutno zahrnout skutečně měřenou hodnotu proudu pro vstup 0-20 mA.



#### 6.4 Nejistota typu B pro tlak $p_1$

Vyjádřena vztahem:

$$U_B(p_1) = \sqrt{(U_B(p_S))^2 + (U_B(p_{AD}))^2} \quad (6.6)$$

Kde  $U_B(p_1)$  je rozšířená nejistota typu B tlakové difference [kPa]

$U_B(p_S)$  je rozšířená nejistota typu B snímače [kPa]

$U_B(p_{AD})$  je rozšířená nejistota typu B AD převodníku [kPa]

Rozšířená nejistota  $U_B(p_S)$  vychází z třídy přesnosti tlakového snímače.

$$U_B(p_S) = T_P \cdot p_{MAX} \quad (6.7)$$

Kde  $p_{MAX}$  je rozsah snímače [kPa]

Rozšířená nejistota ( $U_B(p_{AD})$ ) vychází z nejistoty AD převodníku. Skládá se z nejistoty jednoho digitu a třídy přesnosti měřicí karty.

$$U_B(p_{AD}) = T_P \cdot p_{MAX} + D \quad (6.8)$$

Kde  $T_P$  je třída přesnosti [1]

$D$  je jeden digit  $D = 0,0122$  [kPa]

Třída přesnosti ( $T_P$ ) je 0,0025 % z naměřené hodnoty, je nutno zahrnout skutečně měřenou hodnotu proudu pro vstup 0-20 mA.

#### 6.5 Nejistota typu B pro tlak $p_2$

Vyjádřena vztahem:

$$U_B(p_2) = \sqrt{(U_B(p_S))^2 + (U_B(p_{AD}))^2} \quad (6.9)$$

Kde  $U_B(p_2)$  je rozšířená nejistota typu B tlakové difference [kPa]

$U_B(p_S)$  je rozšířená nejistota typu B snímače [kPa]

$U_B(p_{AD})$  je rozšířená nejistota typu B AD převodníku [kPa]

Rozšířená nejistota  $U_B(p_S)$  vychází z třídy přesnosti tlakového snímače.

$$U_B(p_S) = T_P \cdot p_{MAX} \quad (6.10)$$

Kde  $p_{MAX}$  je rozsah snímače [kPa]

Rozšířená nejistota ( $U_B(p_{AD})$ ) vychází z nejistoty AD převodníku. Skládá se z nejistoty jednoho digitu a třídy přesnosti měřicí karty.

$$U_B(p_{AD}) = T_P \cdot p_{MAX} + D \quad (6.11)$$

Kde  $T_P$  je třída přesnosti [1]

$D$  je jeden digit  $D = 0,078$  [kPa]

Třída přesnosti ( $T_P$ ) je 0,0025 % z naměřené hodnoty, je nutno zahrnout skutečně měřenou hodnotu proudu pro vstup 0-20 mA.

## 6.6 Nejistota typu B pro tlakovou diferenci $\Delta p$

Vyjádřena vztahem:

$$U_B(\Delta p) = \sqrt{(U_B(\Delta p_S))^2 + (U_B(\Delta p_{AD}))^2} \quad (6.12)$$

Kde  $U_B(\Delta p)$  je rozšířená nejistota typu B tlakové difference [kPa]

$U_B(\Delta p_S)$  je rozšířená nejistota typu B snímače [kPa]

$U_B(\Delta p_{AD})$  je rozšířená nejistota typu B AD převodníku [kPa]

Rozšířená nejistota  $U_B(\Delta p_S)$  vychází z třídy přesnosti tlakového snímače.

$$U(\Delta p_S) = T_P \cdot \Delta p_{MAX} \quad (6.13)$$

Kde  $p_{MAX}$  je rozsah snímače [kPa]

Rozšířená nejistota ( $U_B(\Delta p_{AD})$ ) vychází z nejistoty AD převodníku. Skládá se z nejistoty jednoho digitu a třídy přesnosti měřicí karty.

$$U_B(\Delta p_{AD}) = T_P \cdot \Delta p_{MAX} + D \quad (6.14)$$

Kde  $T_P$  je třída přesnosti [1]

$D$  je jeden digit  $D = 0,024$  [kPa]

Třída přesnosti ( $T_P$ ) je 0,0025 % z naměřené hodnoty, je nutno zahrnout skutečně měřenou hodnotu proudu pro vstup 4-20 mA.

## 6.7 Nejistota typu B pro otáčky $n$

Vyjádřena vztahem:

$$U_B(n) = \sqrt{(U_B(n_S))^2 + (U_B(n_{AD}))^2} \quad (6.15)$$

Kde  $U_B(n)$  je rozšířená nejistota typu B pro otáčky [ $s^{-1}$ ]

$U_B(n_S)$  je rozšířená nejistota typu B snímače [ $s^{-1}$ ]

$U_B(n_{AD})$  je rozšířená nejistota typu B AD převodníku [ $s^{-1}$ ]

Rozšířená nejistota  $U_B(n_S)$  vychází z třídy přesnosti tlakového snímače.

$$U_B(n_S) = T_P \cdot n_{MAX} \quad (6.16)$$

Kde  $n_{MAX}$  je rozsah snímače [ $s^{-1}$ ]

Rozšířená nejistota ( $U_B(n_{AD})$ ) vychází z nejistoty AD převodníku. Skládá se z nejistoty jednoho digitu a třídy přesnosti měřicí karty.

$$U_B(n_{AD}) = T_P \cdot n_{MAX} + D \quad (6.17)$$

Kde  $T_P$  je třída přesnosti [1]

$D$  je jeden digit  $D = 0,0325$  [ $s^{-1}$ ]

Třída přesnosti ( $T_P$ ) je 0,0025 % z naměřené hodnoty, je nutno zahrnout skutečně měřenou hodnotu proudu pro vstup 0-20 mA.

### 6.8 Nejistota typu B pro kroutící moment $M_k$

Vyjádřena vztahem:

$$U_B(M_k) = \sqrt{(U_B(M_S))^2 + (U_B(M_{AD}))^2} \quad (6.18)$$

Kde  $U_B(M_k)$  je rozšířená nejistota typu B tlakové difference [Nm]

$U_B(M_S)$  je rozšířená nejistota typu B snímače [Nm]

$U_B(M_{AD})$  je rozšířená nejistota typu B AD převodníku [Nm]

Rozšířená nejistota  $U_B(M_S)$  vychází z třídy přesnosti tlakového snímače.

$$U_B(M_S) = T_P \cdot M_{MAX} \quad (6.19)$$

Kde  $M_{MAX}$  je rozsah snímače [Nm]

Rozšířená nejistota ( $U_B(M_{AD})$ ) vychází z nejistoty AD převodníku. Skládá se z nejistoty jednoho digitu a třídy přesnosti měřicí karty.

$$U_B(M_{AD}) = T_P \cdot p_{MAX} + D \quad (6.20)$$

Kde  $T_P$  je třída přesnosti [1]

$D$  je jeden digit  $D = 0,0244$  [Nm]

Třída přesnosti ( $T_P$ ) je 0,0025 % z naměřené hodnoty, je nutno zahrnout skutečně měřenou hodnotu proudu pro vstup 0-20 mA.

### 6.9 Nejistota typu B pro měrnou energii

Vztah pro měrnou energii (2.20) lze přepsat s vyžitím ztrátové energie (2.18) ve tvaru:

$$Y = \frac{\Delta p}{\rho} + \frac{Q^2}{2} \left( \frac{1}{S_1^2} \left( 1 - \frac{\lambda l}{D} \right) - \frac{1}{S_2^2} \right) \quad (6.21)$$

Kde  $\Delta p$  je rozdíl tlaků neměřený snímačem [Pa]

$\rho$  je hustota vody [ $\text{kgm}^{-3}$ ]

$Q$  je průtok [ $\text{m}^3\text{s}^{-1}$ ]

$\lambda$  je ztrátový součinitel [1]

$l$  je délka potrubí [m]

$D$  je průměr potrubí [m]

$S_1$  je plocha průřezu potrubí v bodě 1 [ $\text{m}^2$ ]

$S_2$  je plocha průřezu potrubí v bodě 2 [ $\text{m}^2$ ]

Nejistota je vyjádřena vztahem:

$$\begin{aligned}
 U_B(Y) &= \sqrt{\left(\frac{\partial Y}{\partial \Delta p} U_B(\Delta p)\right)^2 + \left(\frac{\partial Y}{\partial Q} U_B(Q)\right)^2} = \\
 &= \sqrt{\left(\frac{1}{\rho} U_B(\Delta p)\right)^2 + \left(Q \left(\frac{1}{S_1^2} \left(1 - \frac{\lambda l}{D}\right) - \frac{1}{S_2^2}\right) U_B(Q)\right)^2}
 \end{aligned} \tag{6.22}$$

Kde  $U_B(Y)$  je rozšířená nejistota typ B pro měrnou energii [Jkg<sup>-1</sup>]

$Y$  je měrná energie [Jkg<sup>-1</sup>]

$Q$  je průtok [m<sup>3</sup>s<sup>-1</sup>]

$U_B(\Delta p)$  je rozšířená nejistota typu B pro diferenci tlaků [kPa]

$U_B(Q)$  je rozšířená nejistota typu B pro průtok [m<sup>3</sup>s<sup>-1</sup>]

#### 6.10 Nejistota typu B pro účinnost

Vyjádřena vztahem:

$$\begin{aligned}
 U_B(\eta) &= \sqrt{\left(\frac{\partial \eta}{\partial M_k} U_B(M_k)\right)^2 + \left(\frac{\partial \eta}{\partial n} U_B(n)\right)^2 + \left(\frac{\partial \eta}{\partial Y} U_B(Y)\right)^2 + \left(\frac{\partial \eta}{\partial Q} U_B(Q)\right)^2} = \\
 &= \sqrt{\left(\frac{M_k \cdot 2\pi n}{Y Q \rho}\right)^2 \cdot \left(\left(\frac{1}{M_k} U_B(M_k)\right)^2 + \left(\frac{1}{n} U_B(n)\right)^2 + \left(-\frac{1}{Q} U_B(Y)\right)^2 + \left(-\frac{1}{Q} U_B(Q)\right)^2\right)} \\
 \Rightarrow \frac{U_B(\eta)}{\eta} &= \sqrt{\left(\frac{\partial \eta}{\partial n} U_B(n)\right)^2 + \left(\frac{\partial \eta}{\partial Y} U_B(Y)\right)^2 + \left(\frac{\partial \eta}{\partial Q} U_B(Q)\right)^2}
 \end{aligned} \tag{6.23}$$

#### 6.11 Nejistota typu B pro jednotkové otáčky

Vyjádřena vztahem:

$$\begin{aligned}
 U_B(n_{11}) &= \sqrt{\left(\frac{\partial n_{11}}{\partial n} U_B(n)\right)^2 + \left(\frac{\partial n_{11}}{\partial Y} U_B(Y)\right)^2} = \\
 &= \sqrt{\left(\frac{n D \sqrt{g}}{\sqrt{Y}}\right)^2 \cdot \left(\left(\frac{1}{n} U_B(n)\right)^2 + \left(-\frac{1}{2 \cdot Y} U_B(Y)\right)^2\right)}
 \end{aligned} \tag{6.24}$$

## 6.12 Nejistota typu B pro jednotkový moment

Vyjádřena vztahem:

$$\begin{aligned}
 U_B(M_{11}) &= \sqrt{\left(\frac{\partial M_{11}}{\partial M_k} U_B(M_k)\right)^2 + \left(\frac{\partial M_{11}}{\partial Y} U_B(Y)\right)^2} = \\
 &= \sqrt{\left(\frac{M_k \cdot g}{D^3 Y}\right)^2 \cdot \left(\left(\frac{1}{M_k} U_B(M_k)\right)^2 + \left(-\frac{1}{Y} U_B(Y)\right)^2\right)}
 \end{aligned} \tag{6.25}$$

## 6.13 Nejistota typu B pro jednotkový výkon

Vyjádřena vztahem:

$$\begin{aligned}
 U_B(\eta) &= \sqrt{\left(\frac{\partial \eta}{\partial M_k} U_B(M_k)\right)^2 + \left(\frac{\partial \eta}{\partial n} U_B(n)\right)^2 + \left(\frac{\partial \eta}{\partial Y} U_B(Y)\right)^2} = \\
 &= \sqrt{\left(\frac{M_k \cdot 2\pi n \sqrt{g^3}}{D^2 \sqrt{Y^3}}\right)^2 \cdot \left(\left(\frac{1}{M_k} U_B(M_k)\right)^2 + \left(\frac{1}{n} U_B(n)\right)^2 + \left(-\frac{3}{2 \cdot Y} U_B(Y)\right)^2\right)}
 \end{aligned} \tag{6.26}$$

## 7 Automatizované vyhodnocení výsledků měření

Pro zrychlení vyhodnocování výsledků měření byl vytvořen výpočetní sešit v aplikaci Microsoft Excel obsahující krom běžných výpočetních vzorců také makra v jazyce VBA usnadňující zpracování větších objemů naměřených dat. Kód byl vytvářen v aplikaci Microsoft Excel ve verzi 2013 a pro správnou funkci při vytváření grafů vyžaduje objekt VBScript\_RegExp\_55.regExp. Veškerý kód starající se o vyhodnocení a tvorbu grafů se nachází v prvním modulu (Module1), kde může být dále upravován.

### 7.1 Výpočty

#### 7.1.1 Vstupní data

Jako vstup jsou očekávány sloupce s hodnotami měřených veličin v listu „Měřené hodnoty“ viz příložený datový soubor a obrázek 10. Důležité je dodržet správné pořadí sloupců a předepsané jednotky.

	Číslo měření	$\Delta p$	$p_1$	$p_2$	$M_k$	$n$	$T$	$Q$
		[kPa]	[kPa]	[kPa]	[Nm]	[min <sup>-1</sup> ]	[°C]	[l s <sup>-1</sup> ]

Obrázek 10: Hlavička tabulky vstupních dat v příloženém datovém souboru.

Očekáváno je několik variant měřených při různých spádech (dva spády na variantu<sup>2</sup>). Bloky dat pro jednotlivé spády se oddělují minimálně jedním prázdným řádkem. Přičemž název varianty (dále používaný pro pojmenování vytvářených grafů viz kapitola 7.2.1 a 7.2.2) se nachází o jeden řádek výš a jeden sloupec doleva od prvního čísla měření viz obrázek 11. Řádek zabíraný názvem je při rozdělávání bloků dat podle spádů považován za prázdný.

	18101	14,45948	115,7478	110,7991	1,470253	1805,388	126,5764	18,3226
Původní varianta H = 4 m								
	6000	40,07512	141,4594	110,8488	32,54728	602,9191	96,62581	18,34598
	7000	40,11002	141,4509	110,8515	31,64918	703,6752	100,1422	18,35564
	8000	40,11481	141,499	110,8291	30,65955	805,1172	103,7368	18,37732
	9100	39,93563	141,3113	110,8392	29,32776	905,505	107,3604	18,40441

Obrázek 11: Oddělení bloků dat pro jednotlivé spády a jejich pojmenování.

Vymazání dat je možné provést ručně, nebo pomocí tlačítka „Vymazat“ nacházejícího se v listu, které provede smazání vložených dat a zároveň vytvoří jejich zálohu do nově vytvořeného listu.

#### 7.1.2 Konstanty

Při výpočtech je používán určitý počet konstant uvedených v listu „Konstanty“. Všem hodnotám zde uvedených konstant jsou přiřazeny názvy v sešitu s globální platností.

#### 7.1.3 Tabulka vypočtených hodnot

V listu „Měřené-počítané hodnoty“ se nachází tabulka vypočtených hodnot vytvářená makrem. Před její aktualizací je vhodné vymazat všechny hodnoty nacházející se v šestém řádku a níže. Tabulka je vytvářena z prvního řádku hodnot a jejich změna se tak po spuštění makra nactiData projeví ve všech vyplňovaných řádcích příslušného sloupce.

<sup>2</sup> Pro zvýšení počtu měřených spádů je pro správnou funkci maker pro vykreslování grafů třeba upravit proceduru charakteristikaGraf(), konkrétně proměnnou poKolika.

### nactiData

Makro nactiData a s ním spojená procedura nactiData() jsou spustitelné přes vývojářský panel v aplikaci Microsoft Excel a provádí:

- Zkopírování názvů variant a měřených hodnot z listu „Měřené hodnoty“ s vynecháním chybných řádků (záporná difference tlaků  $\Delta p$ ) a oddělení jednotlivých bloků hodnot jedním řádkem.
- „Roztažení“ vzorců v prvním řádku hodnot v listu „Měřené-počítané hodnoty“ pro všechny řádky načtených měřených hodnot.

## 7.2 Grafy

### 7.2.1 Rychlostní trojúhelníky

K vykreslování rychlostních trojúhelníků slouží list „Rychlostní trojúhelníky“ spolu s makrem rychlostniTrojuhelniky

#### rychlostniTrojuhelniky

- Smazání obsahu všech buněk a všech grafů v listu „Rychlostní trojúhelníky“.
- Přiřazení globálních názvů blokům hodnot připadajících k určitému bloku dat podle vzoru: `nazev_veliciny\cislo_bloku` – tzn. `nazev_c_u2\4` oblast obsahující všechny buňky s hodnotami `c_u2` ve 4. bloku dat (při dvou spádech na variantu OK – 2. varianta, 2. spád).
- Vytvoření tabulek s hodnotami rychlostí a souřadnicemi pro vykreslení grafů.
- Vykreslení grafů znázorňujících rychlostní trojúhelníky.
- Pojmenování grafů podle názvů jednotlivých variant

### 7.2.2 Grafy tří veličin

Pro vykreslování charakteristiky turbíny či závislostí dalších veličin na účinnosti a jednotkových otáčkách slouží makro Grafy, spouštějící několik procedur charakteristikaGraf() s různými parametry.

#### Grafy

- Vytvoří nové listy obsahující grafy, které znázorňují: Charakteristiku turbíny a závislosti dalších veličin ( $P_{11}$ ,  $M_{11}$ ,  $\alpha_2$ ,  $\beta_1$  a  $\beta_2$ ) spolu s účinností na jednotkových otáčkách. Před spuštěním tohoto makra je nutné vymazat či přejmenovat dříve vytvořené listy obsahující výše jmenované grafy.

#### charakteristikaGraf()

- Vytvoří a pojmenuje nový list obsahující bodový graf se dvěma osami Y (jednou osou X) dle zadaných parametrů z hodnot v listu „Měřené-počítané hodnoty“.
- Každou číselnou řadu proloží polynomem zvoleného (max. 6.) stupně a přiřadí jí předem určenou barvu.<sup>3</sup>
- Pojmenuje graf i jeho osy podle zadaných parametrů.
- V listu se nesmí nacházet list se stejným názvem, jako se procedura snaží vytvořit.

<sup>3</sup> V kódu je definovaných 8 barev. Pokud bude vykreslováno více než 8 polynomů, je třeba definovat další barvy úpravou kódu procedury charakteristikaGraf().

Vyžaduje čtyři parametry:

1. Začátek názvu grafu jako text
2. Název veličiny pro osu X jako text
3. Název veličiny pro osu Y (hlavní) jako text
4. Název veličiny pro osu Y (vedlejší) jako text
5. Stupeň polynomu, kterým budou proloženy řady jako číslo (max. 6)

Názvy veličin odpovídají definovanému názvu sloupce (celého) obsahujícího požadovanou veličinu v listu „Měřené-počítané hodnoty“ a začátek názvu grafu je libovolný text. Celý název grafu bude složen ze začátku názvu grafu a doplněn o názvy veličin. Pro vytvoření charakteristiky turbíny (viz graf 6) bylo použito následujících parametrů:

charakteristikaGraf("Charakteristika pětilopatové vírové turbíny, závislost", "n\_11", ChrW(951), "Q\_11")

Kde "Charakteristika pětilopatové vírové turbíny, závislost" je začátek názvu

"n\_11" je definovaný název jednotkových otáček

ChrW(951) je funkce vracející  $\eta$ , což je definovaný název účinnosti

"Q\_11" je definovaný název jednotkových otáček

### 7.3 Q-H diagram

List „Q-H charakteristika“ není vytvářen makry, ale je přímo ovlivňován daty z listu „Měřené-počítané hodnoty“. Při zadání nových dat je nutné (ručně) upravit následující:

- Definovaný název Q\_11\matice nastavit tak, aby oblast začínala v buňce obsahující první hodnotu Q<sub>11</sub> a končila v buňce obsahující poslední hodnotu Q<sub>11</sub> varianty OK s nejvyšší účinností.
- Analogicky s předchozím nastavit definované názvy (n\_11\matice a  $\eta$ \_11\matice).
- V případě, že se ve sloupcích (AE až AH) nezobrazí všechny hodnoty náležející variantě OK s nejvyšší účinností, „roztáhnout“ vzorec pro tyto buňky přes další řádky. (V současnosti zasahuje až do 500. řádku).
- Přidat/upravit hodnoty v tabulce konstantních hodnot (zobrazovaných v grafu)
- „Roztáhnout“ tabulky s výpočty průtoku Q a spádu H na požadovaný rozsah.
- Upravit hodnotu v buňce C6 – Jednotkové otáčky, pro něž bude vykreslována Q-H charakteristika.



## Závěr

Provedené měření modelové pětilopátové vírové turbíny 5VT200 prokázalo, že při zkracování lopatek dochází ke změnám charakteristiky této turbíny a do určité míry zkrácení také k nárůstu účinnosti. To potvrzuje předchozí předpoklad, že přenos energie probíhá především na začátku lopatky a příliš dlouhá lopatka účinnost naopak snižuje. Pro účely měření byla lopatka turbíny zkracována ze strany odtokové hrany a to až do té míry, kdy došlo k poklesu účinnosti. Při zkracování odtokové hrany došlo také ke změně odtokového úhlu lopatky podpilováním ze sací strany. Až poté bylo přistoupeno ke zkracování ze strany náběžné, ale toto další zkracování už nemělo pozitivní vliv na účinnost. Dá se tedy předpokládat, že při zkracování z odtokové hrany klesla délka lopatky pod optimální hodnotu. Měření tak vypovídá především o vlivu zkracování délky lopatky ze strany odtokové hrany. Je možné, že při zkracování pouze ze strany náběžné hrany by byl vliv délky lopatky na účinnost odlišný.

Pro měřené i počítané veličiny byla stanovena nejistota měření, všech přímo měřených veličin a následně i hodnot počítaných. Byly stanoveny nátokové a odtokové úhly spolu s velikostmi středních rychlostí na vstupu a výstupu z oběžného kola, které byly následně zobrazeny v rychlostních diagramech. Znalost těchto úhlů pomůže při návrhu nových hydraulik pro vysoké průtoky a malé spády.

V rámci vyhodnocení měření byl vytvořen výpočtový sešit aplikace Microsoft Excel, který obsahuje výpočty a grafy znázorňující měřené a počítané veličiny či jejich vzájemné závislosti. Pomocí maker v jazyce VBA jsou automatizovány úkony zahrnující načtení a formátování měřených dat do přehledné tabulky. K tabulce načtených dat je automaticky vytvořena další část tabulky obsahující počítané veličiny. Dále je automatizovaná také tvorba rychlostních diagramů pro všechny měřené varianty oběžného kola včetně popsání grafu a uvedení velikostí vykreslovaných rychlostí. Charakteristiku turbíny, grafy závislostí vstupních a výstupních úhlů či jednotkového průtoku a jednotkového kroutícího momentu na jednotkových otáčkách v porovnání s účinností lze také generovat „na jedno kliknutí“ včetně všech popisků v grafu. Vytvořený výpočetní sešit tak významně urychluje vyhodnocení měření podobného charakteru.

## Seznam použité literatury

1. **Paštěka, František.** Projekt malé vodní elektrárny pro konkrétní lokalitu. *Diplomová práce*. Brno : Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2009. 79 s. Vedoucí diplomové práce doc. Ing. Jaroslav Štigler, Ph.D.
2. VírTurb02. *Energetický ústav na VUT FSI*. [Online] 1888. [Citace: 24. 5. 2014.] [http://www.eu.fme.vutbr.cz/photo\\_full/virturb02?id\\_album=14](http://www.eu.fme.vutbr.cz/photo_full/virturb02?id_album=14).
3. **Haluza, Miloslav a Hudec, Martin.** Vývoj kavitačně odolné vírové turbíny. Brno : autor neznámý, 2013. VUT-EU13303-QR-09-13.
4. **Šob, Ing. František.** *Hydromechanika*. Brno : VUT v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2008. 9788021435780.
5. **ČSN EN 60 193.** *Vodní turbíny, akumulární čerpadla a čerpadlové turbíny - přejímací zkoušky na modelu*. 2002.
6. **Nechleba, Miroslav.** *Vodní turbíny, jejich konstrukce a příslušenství*. Praha : Státní nakladatelství technické literatury, 1962.
7. **Haluza, Miloslav.** Měření LDA v periferiích oběžného kola. *Malé vodní turbíny pro velké průtoky a malé spády - aplikace Kaplanovy turbíny*. Brno : autor neznámý, 2000. VUT-EU-QR-59-00.
8. **Halliday, D, Resnick, R a Walker, J.** *Fyzika*. Brno : Vysoké učení technické v Brně, nakladatelství VUTIUM, 2000. 80-214-1869-9.
9. **ČSN EN 17025.** *Posuzování shody - Všeobecné požadavky na způsobilost zkušebních*. 2005.
10. **Kadrnožka, Jaroslav.** *Lopátkové stroje*. Brno : Akademické nakladatelství CERM, s.r.o. Brno, 2003. 80-7204-297-1.

## Seznam použitých zkratk a symbolů

Označení	Název	Rozměr
$c_1$	Absolutní rychlost na vstupu do oběžného kola	$[\text{ms}^{-1}]$
$c_2$	Absolutní rychlost na výstupu z oběžného kola	$[\text{ms}^{-1}]$
$cm_1$	Meridiální rychlost na vstupu do oběžného kola	$[\text{ms}^{-1}]$
$cm_2$	Meridiální rychlost na výstupu z oběžného kola	$[\text{ms}^{-1}]$
$cu_1$	Průmět absolutní rychlosti do unášivého směru na vstupu do oběžného kola	$[\text{ms}^{-1}]$
$cu_2$	Průmět absolutní rychlosti do unášivého směru na výstupu z oběžného kola	$[\text{ms}^{-1}]$
Č1	Označení čerpadla	-
Č2	Označení čerpadla	-
D	Průměr oběžného kola turbíny, označení digitu	$[\text{m}]$
$D_1$	Vnitřní průřez potrubí	$[\text{m}]$
DS	Označení stanoviště stejnosměrného dynamometru	-
e	Eulerovo číslo	$[1]$
FS	Fakulta strojní	-
g	Gravitační zrychlení	$[\text{ms}^{-2}]$
H	Čistý spád	$[\text{m}]$
h	Geodetická výška	$[\text{m}]$
KS	Sací kotel	-
KU	Označení karty unifikace	-
l	Souřadnice měření LDA	$[\text{mm}]$
L	Moment hybnosti	$[\text{kgm}^2\text{s}^{-1}]$
LDA	Bodová laserová anemometrie	-
m	Hmotnost	$[\text{kg}]$
$M_{11}$	Jednotkový moment	$[\text{Nm}]$
MG	Označení motorgenerátoru	-
MK	Označení snímače kroutícího momentu	-
$M_{\text{kměř}}$	Měřený kroutící moment	$[\text{Nm}]$
$M_{\text{kskut}}$	Skutečný kroutící moment	$[\text{Nm}]$
MO	Označení snímače otáček	-

Označení	Název	Rozměr
N	Označení rezervoáru vody v laboratoři OFI VK	-
n	Otáčky	$[\text{min}^{-1}]$
$n_{11}$	Jednotkové otáčky	$[\text{min}^{-1}]$
NZ	Označení napájecího zdroje	-
OP	Označení ovládacího pultu	-
$p_1$	Tlak v bodě „1“	$[\text{Pa}]$
$p_2$	Tlak v bodě „2“	$[\text{Pa}]$
$p_3$	Tlak v bodě „3“	$[\text{Pa}]$
p	Hybnost	$[\text{kgms}^{-1}]$
PS	Označení pružné spojky	-
PÚ2	Označení úseku potrubí	-
PÚS	Označení úseku potrubí	-
Q	Průtok	$[\text{m}^3\text{s}^{-1}]$
$Q_{11}$	Jednotkový průtok	$[\text{m}^3\text{s}^{-1}]$
r	Poloměr	$[\text{m}]$
Re	Reynoldsovo číslo	[1]
$r_s$	Střední poloměr	$[\text{m}]$
RV	Označení elektrického rozvaděče	-
S	Plocha průtočného průřezu	$[\text{m}^2]$
SP1	Označení snímače tlaku	
SP1	Označení snímače tlaku	-
SP2	Označení snímače tlaku	-
SQ	Označení magnetoindukčního průtokoměru	-
T	Teplota	$[\text{°C}]$
$T_p$	Třída přesnosti	[1]
$u_1$	Unášivá rychlost na vstupu do oběžného kola	$[\text{ms}^{-1}]$
$u_2$	Unášivá rychlost na výstupu z oběžného kola	$[\text{ms}^{-1}]$
U200	Označení uzávěru	-
U210	Označení uzávěru	-
U212	Označení uzávěru	-
U214	Označení uzávěru	-

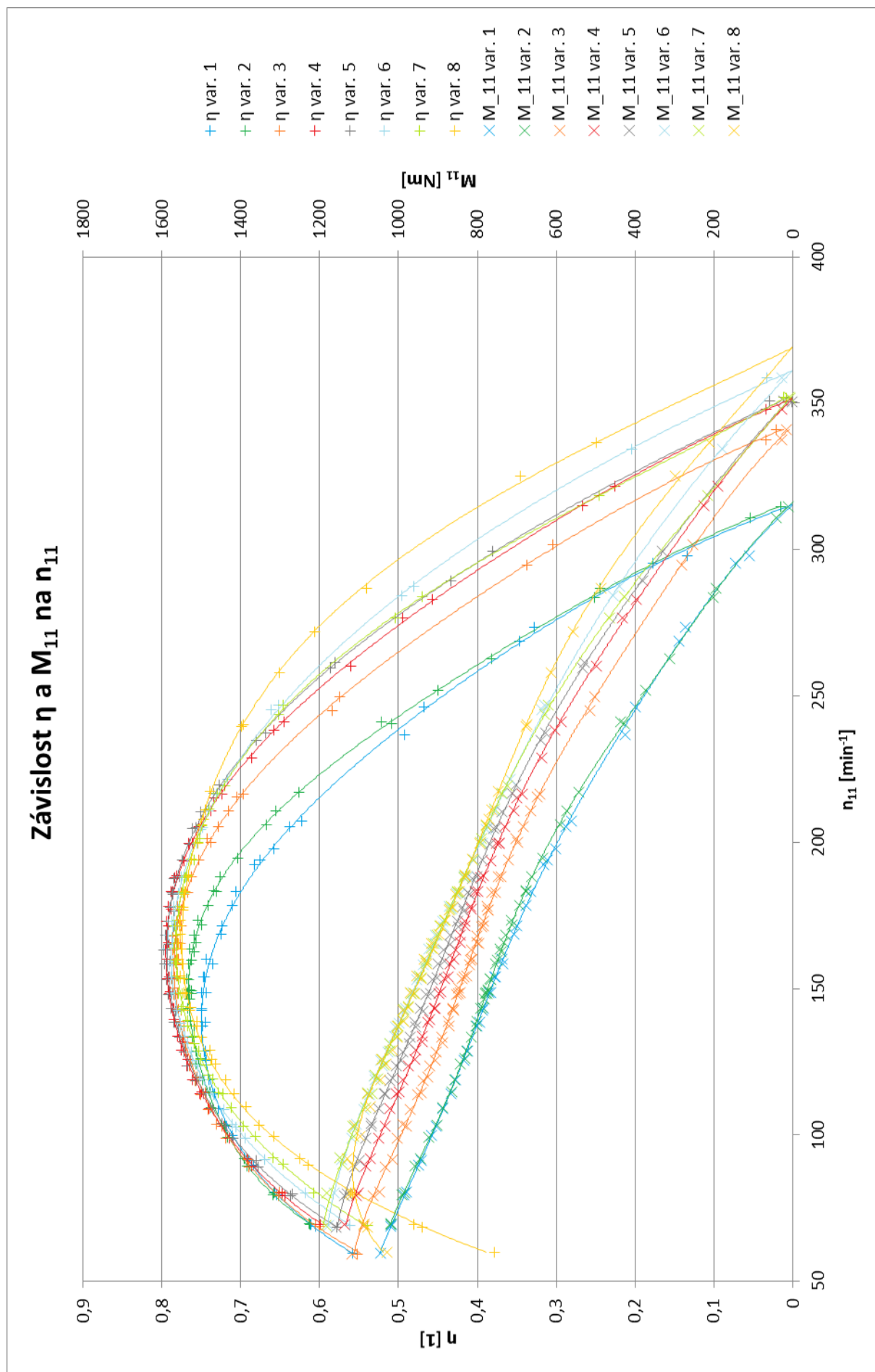
Označení	Název	Rozměr
UB	Rozšířená nejistota typu B	[1]
UZS	Univerzální zkušební stanice	-
$v$	Střední rychlost proudění v potrubí	$[\text{ms}^{-1}]$
$v_1$	Relativní rychlost na vstupu do oběžného kola	$[\text{ms}^{-1}]$
$v_2$	Relativní rychlost na výstupu z oběžného kola	$[\text{ms}^{-1}]$
VBA	Visual Basic for Applications	-
VUT	Vysoké učení technické v Brně	-
Y	Měrná energie	$[\text{Jkg}^{-1}]$
$Y_{\text{id}}$	Ideální měrná energie	$[\text{Jkg}^{-1}]$
$Y_z$	Ztrátová měrná energie	$[\text{Jkg}^{-1}]$
$\alpha$	Vstupní úhel mezi absolutní rychlostí a jejím průmětem unášivého směru	$[\circ]$
$\Delta p$	Diference tlaků	$[\text{Pa}]$
$\Delta Y$	Rozdíl měrných energií	$[\text{Jkg}^{-1}]$
$\varepsilon$	Účinnost převodu	[1]
$\eta$	Účinnost	[1]
$\eta_h$	Hydraulická účinnost	[1]
$\lambda$	Ztrátový součinitel	[1]
$\nu$	Kinematická viskozita	$[\text{m}^2\text{s}^{-1}]$
$\pi$	Ludolfovo číslo	[1]
$\rho$	Hustota	$[\text{kgm}^{-3}]$
$\varphi$	Úhel	$[\circ]$
$\omega$	Úhlová rychlost	$[\text{rads}^{-1}]$
OK	Oběžné kolo turbíny	-
u	Unášivá rychlost	$[\text{ms}^{-1}]$

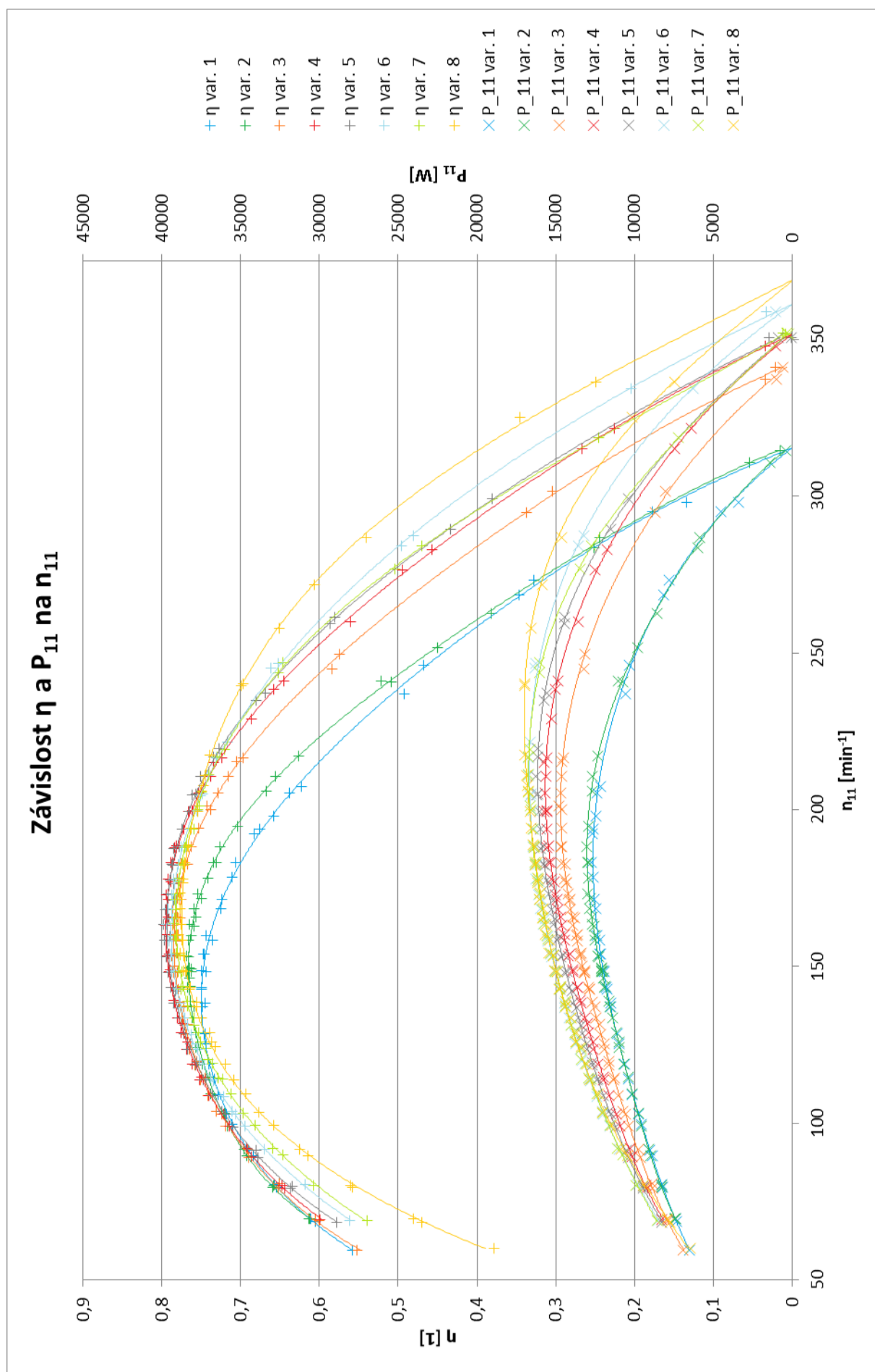
## Seznam příloh

1. Graf závislosti $M_{11}$ a $\eta$ na $n_{11}$ .....	55
2. Graf závislosti $P_{11}$ a $\eta$ na $n_{11}$ .....	54
3. Graf závislosti $\beta_1$ a $\eta$ na $n_{11}$ .....	57
4. Graf závislosti $\alpha_2$ a $\eta$ na $n_{11}$ .....	58
5. Graf závislosti $\beta_2$ a $\eta$ na $n_{11}$ .....	59

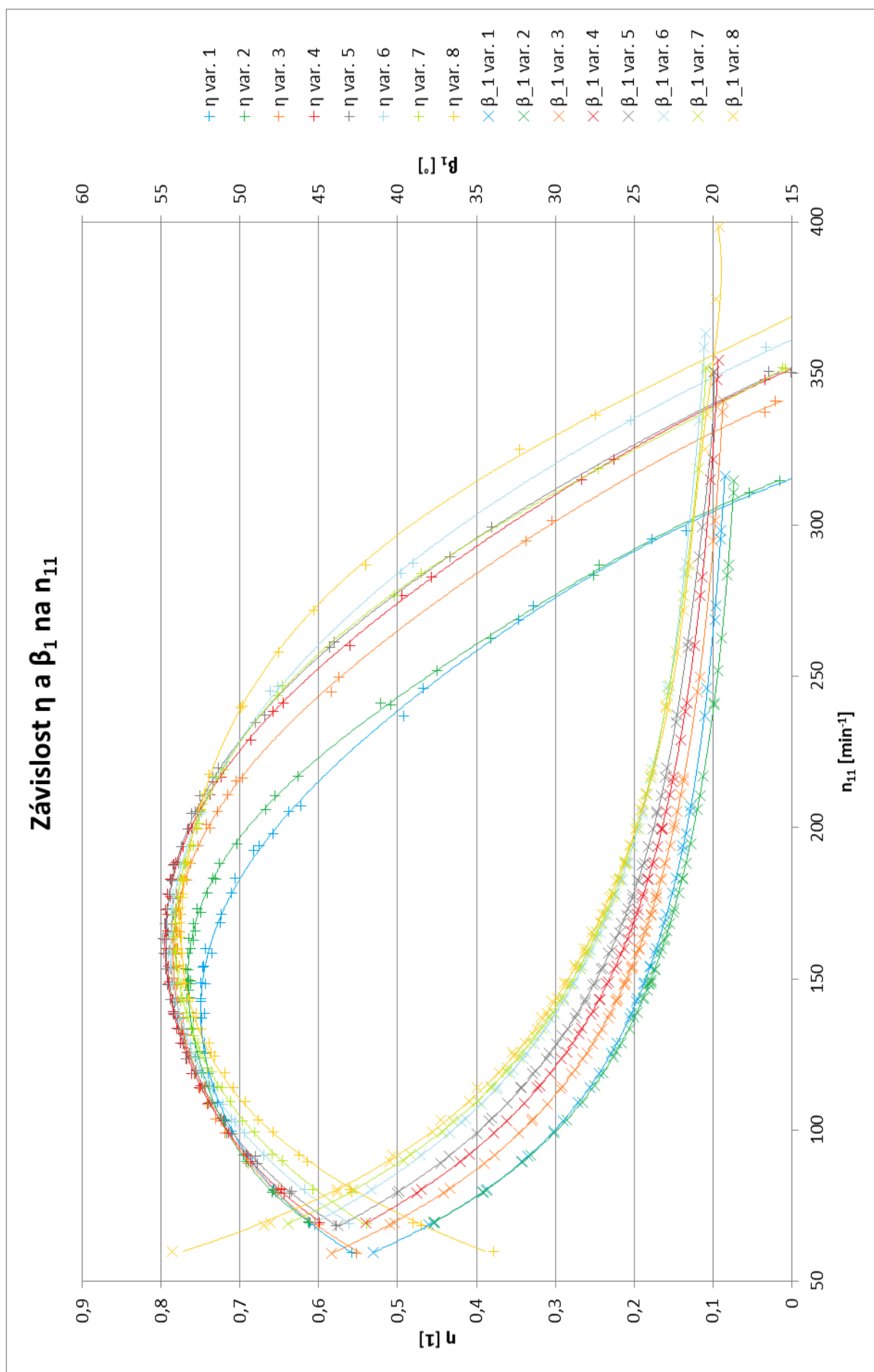
### Rychlostní diagramy

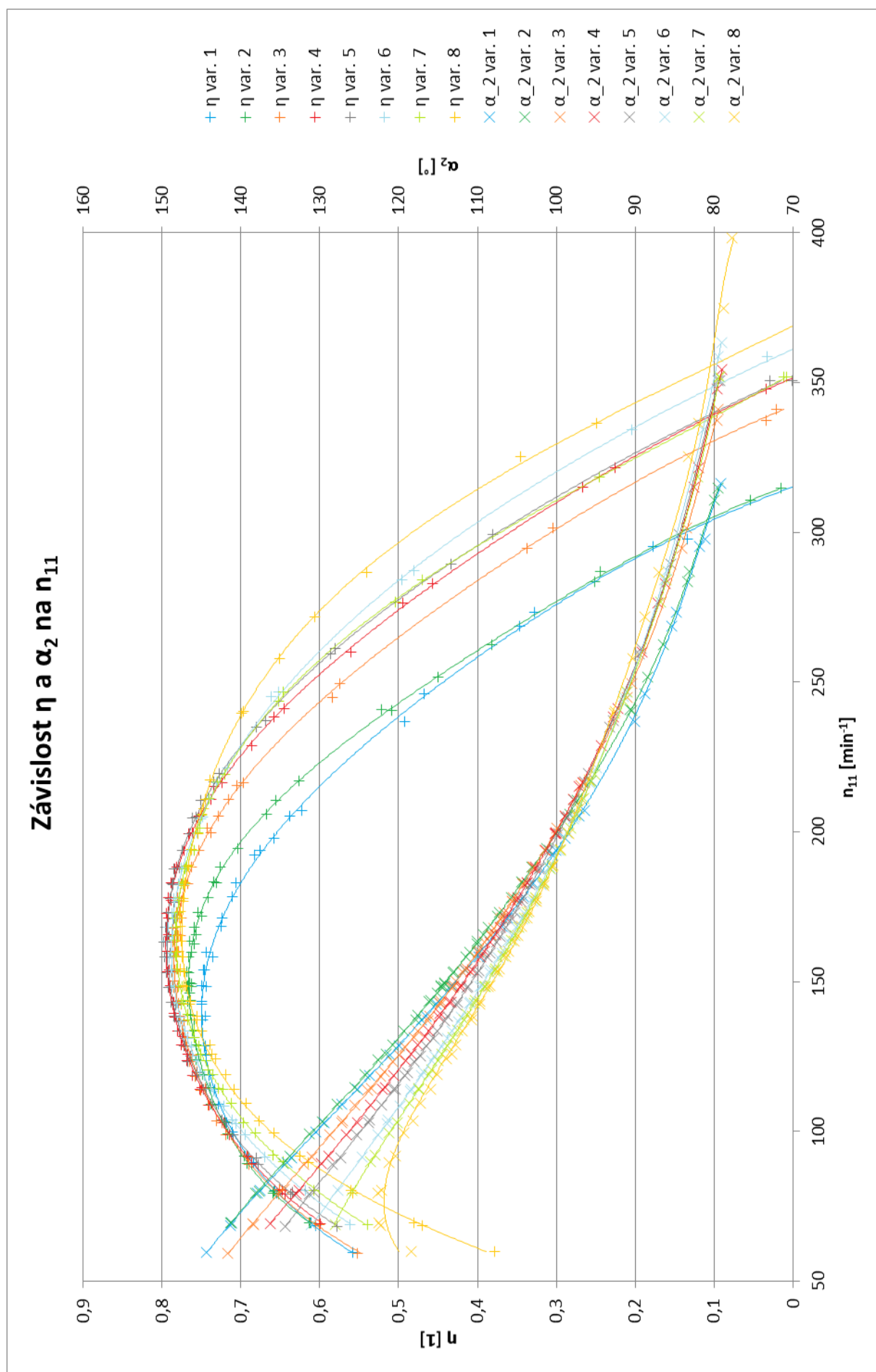
6. Varianta 1 $H = 3$ m.....	60
7. Varianta 1 $H = 4$ m.....	62
8. Varianta 2 $H = 3$ m.....	64
9. Varianta 2 $H = 4$ m.....	66
10. Varianta 3 $H = 3$ m.....	68
11. Varianta 3 $H = 4$ m.....	70
12. Varianta 4 $H = 3$ m.....	72
13. Varianta 4 $H = 4$ m.....	74
14. Varianta 5 $H = 3$ m.....	76
15. Varianta 5 $H = 4$ m.....	78
16. Varianta 6 $H = 3$ m.....	80
17. Varianta 6 $H = 4$ m.....	82
18. Varianta 7 $H = 3$ m.....	84
19. Varianta 7 $H = 4$ m.....	86
20. Varianta 8 $H = 3$ m.....	88
21. Varianta 8 $H = 4$ m.....	90

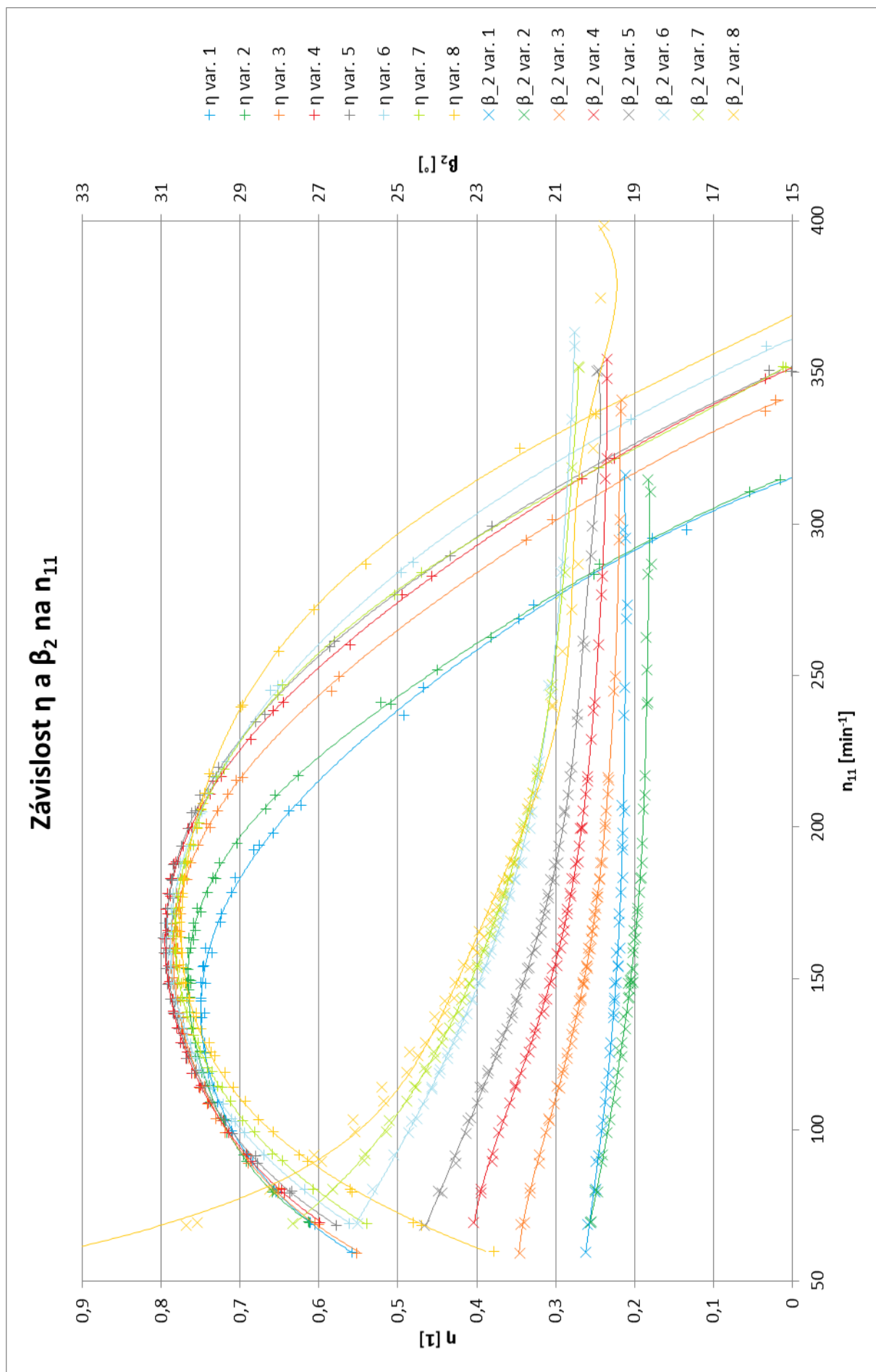


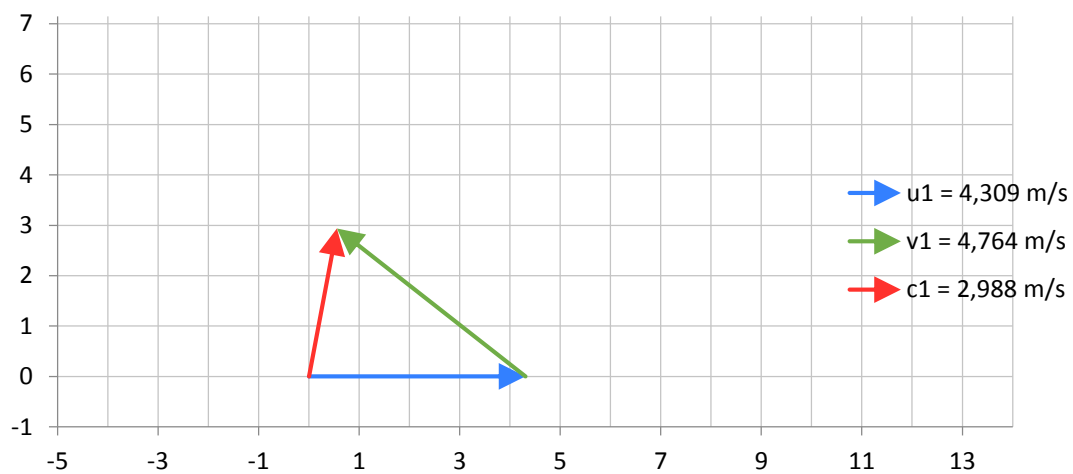
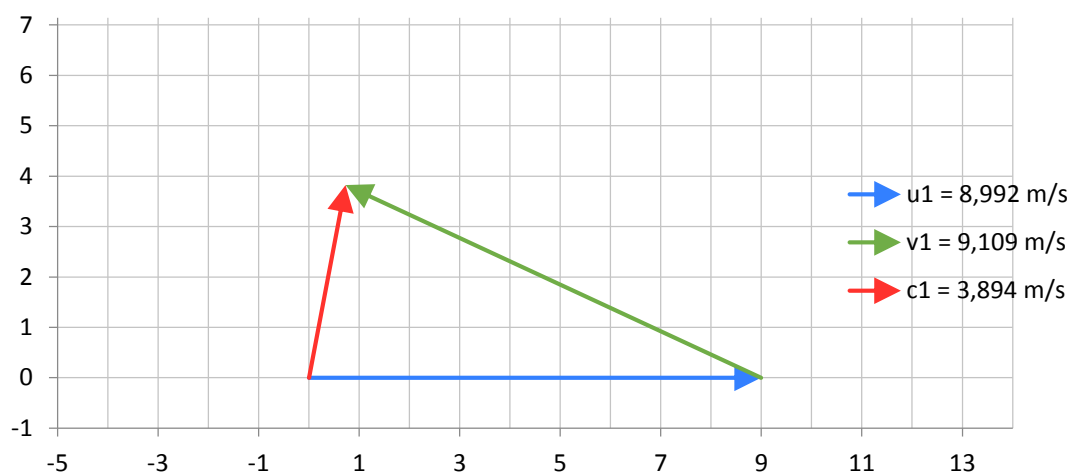
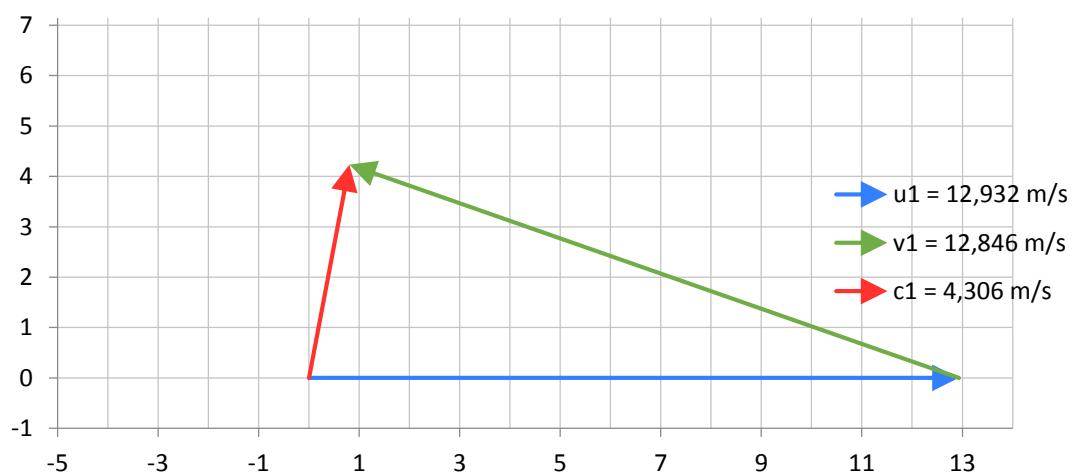


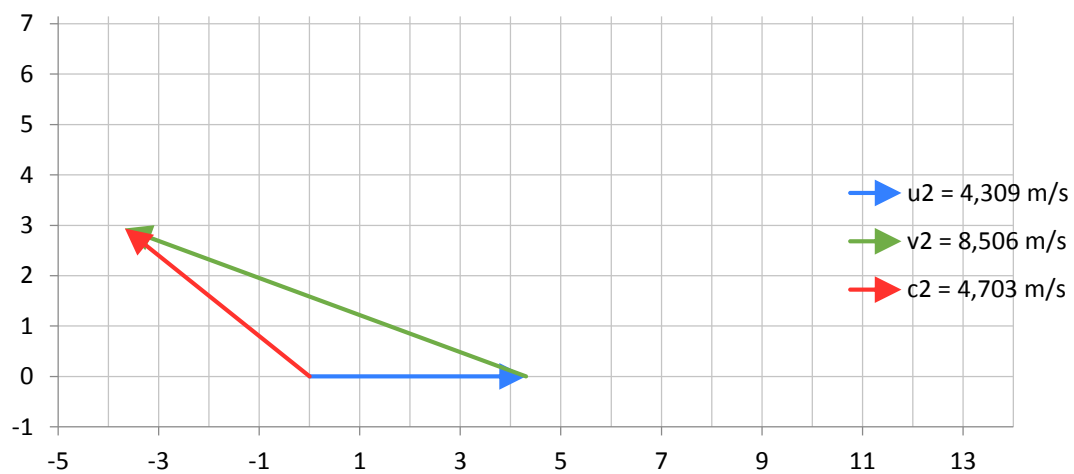
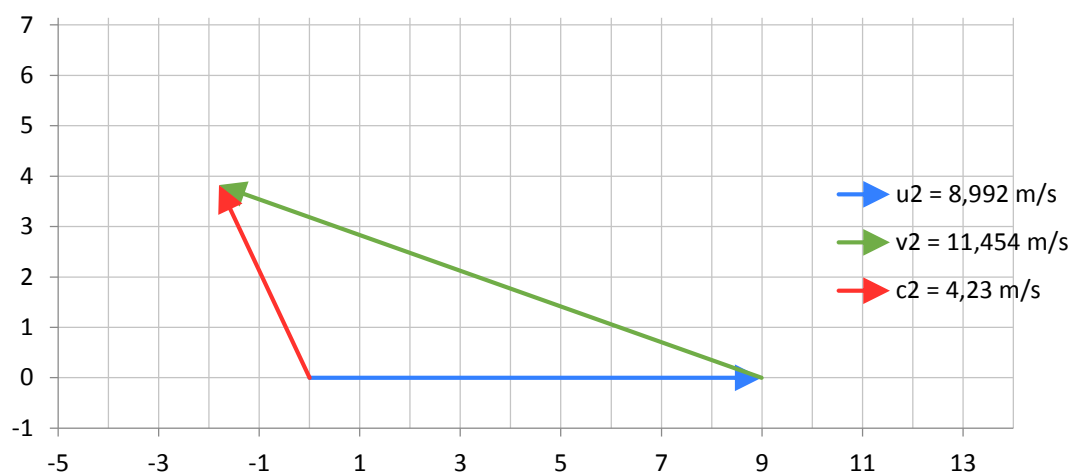
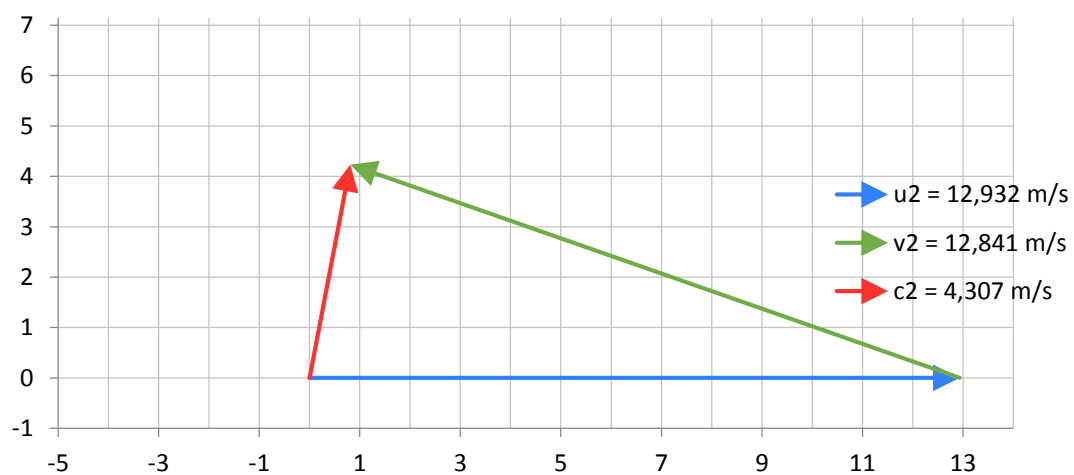


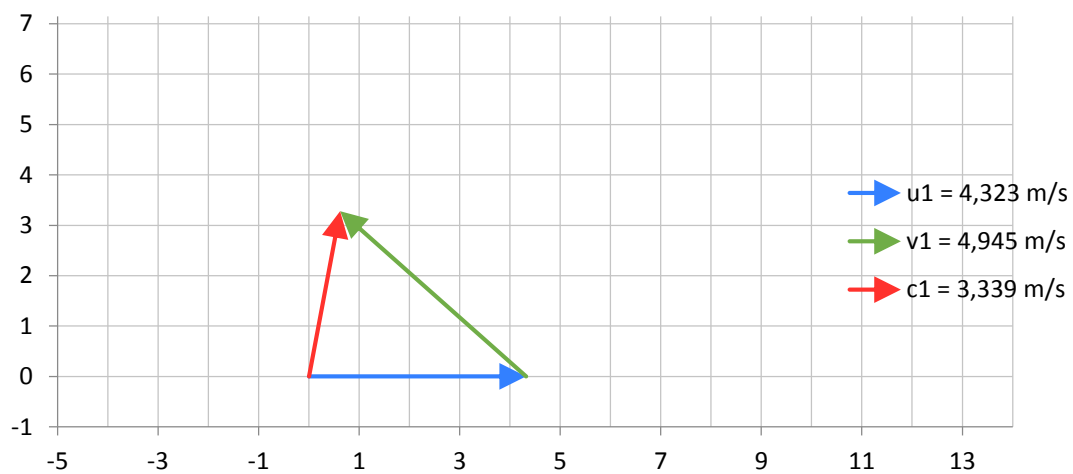
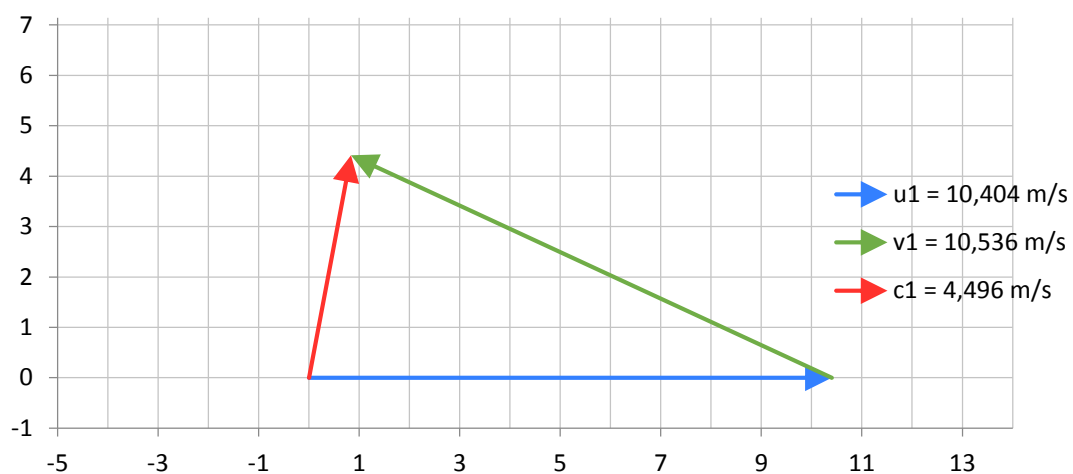
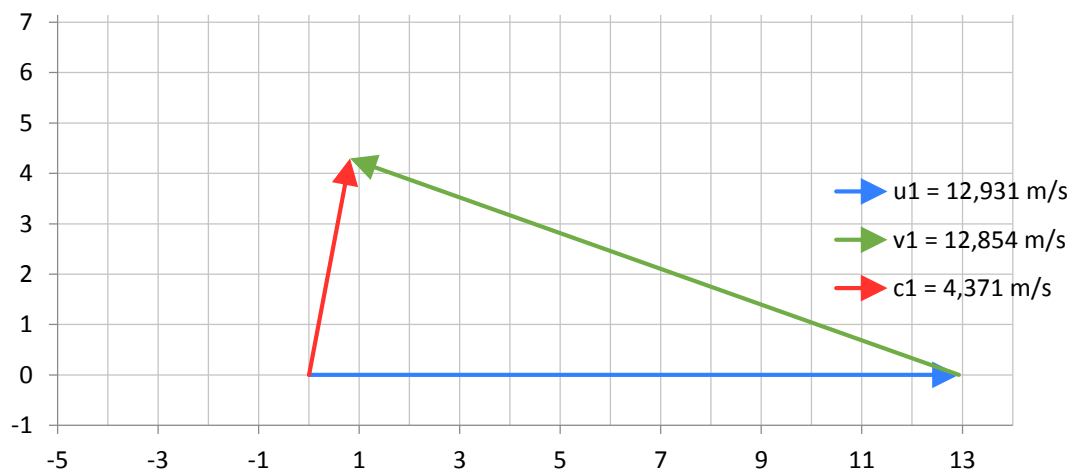


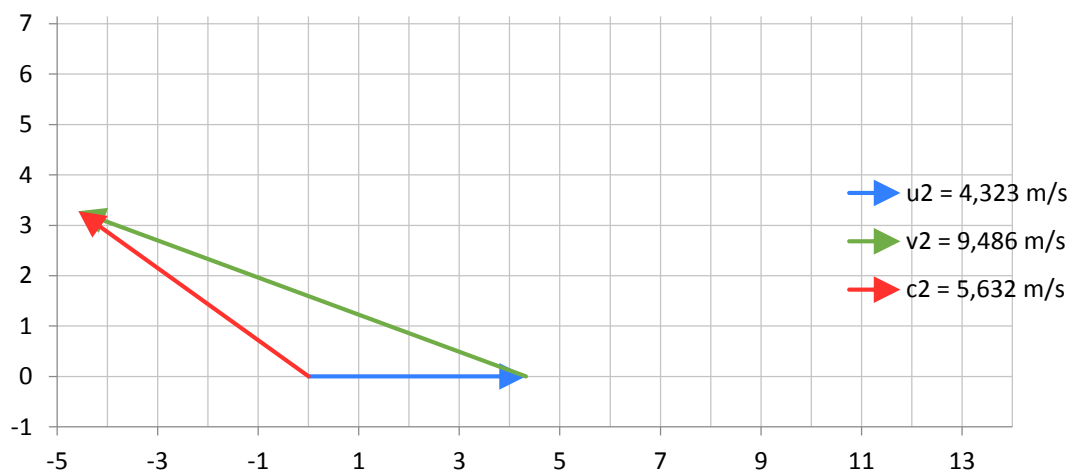
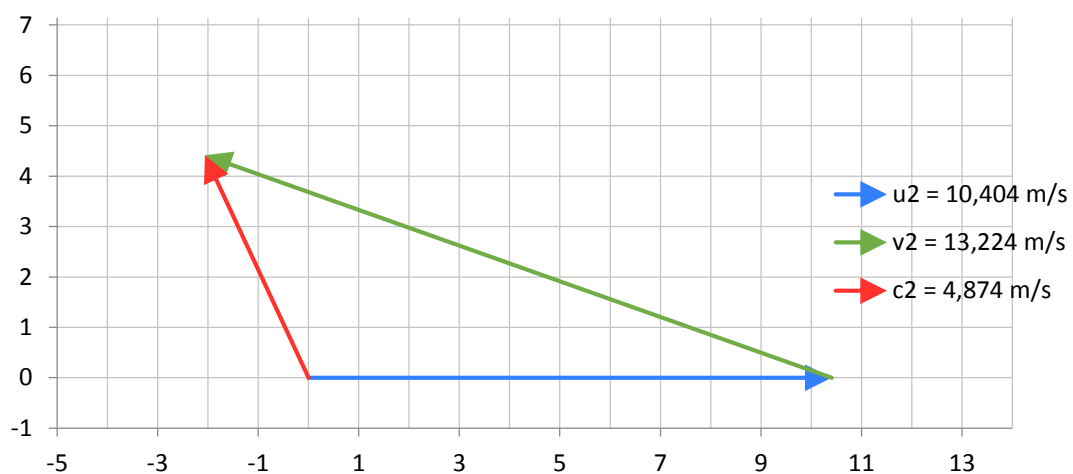


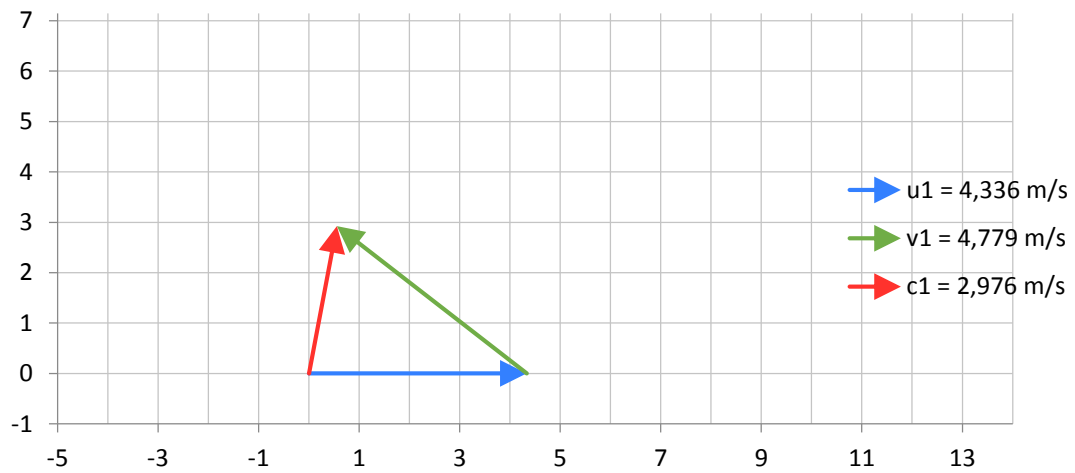
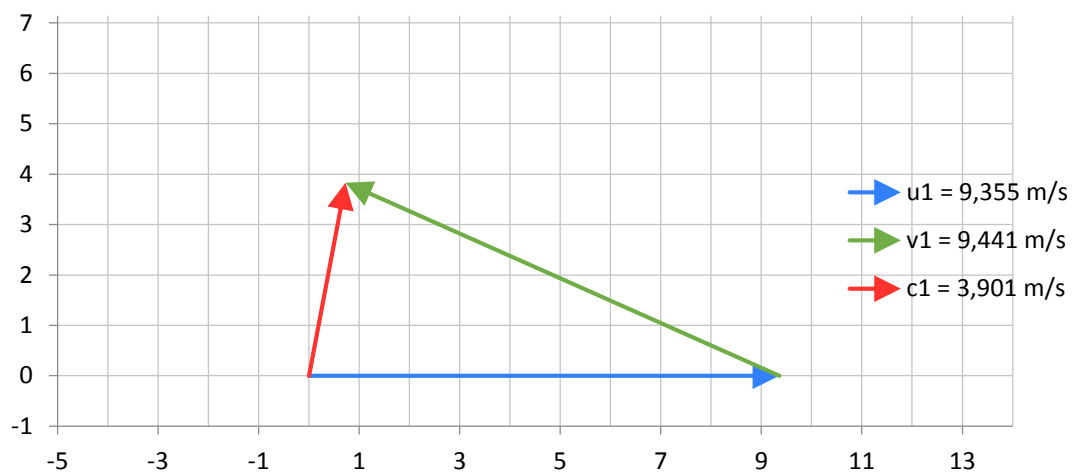
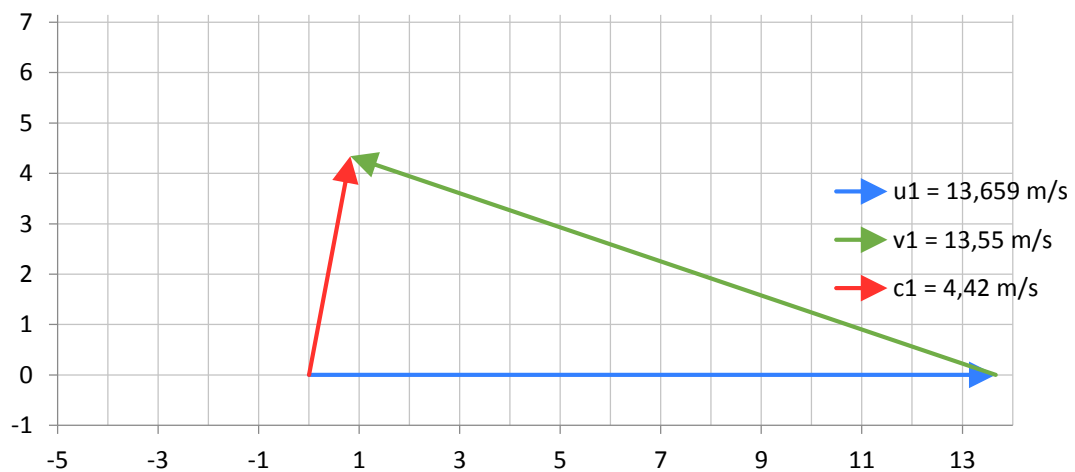


**1. varianta (původní)  $H = 3\text{ m}$  -  $n_{11}\text{ MIN}$** **1. varianta (původní)  $H = 3\text{ m}$  -  $\eta\text{ MAX}$** **1. varianta (původní)  $H = 3\text{ m}$  -  $n_{11}\text{ MAX}$** 

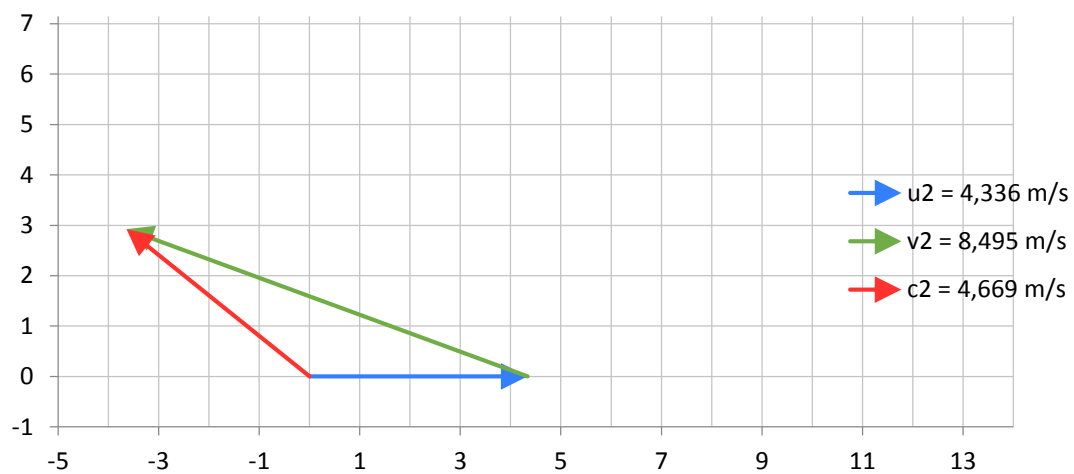
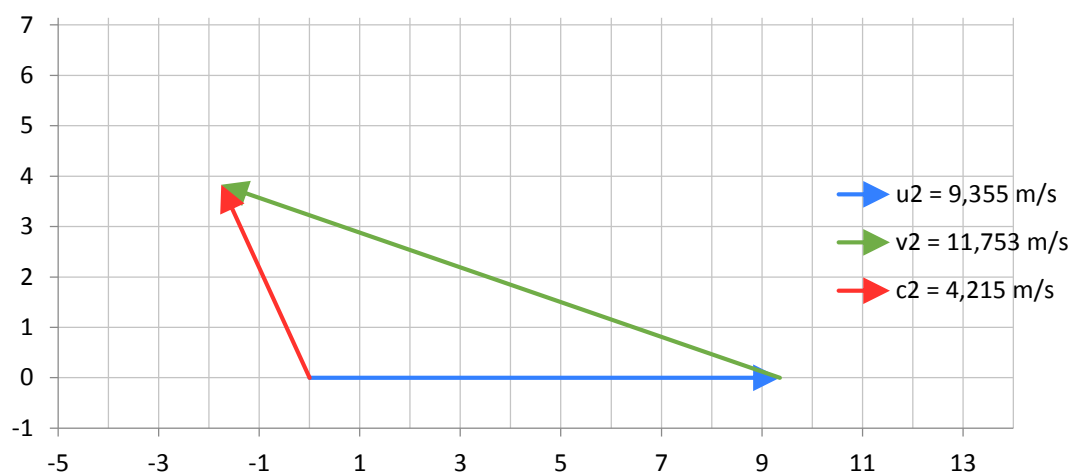
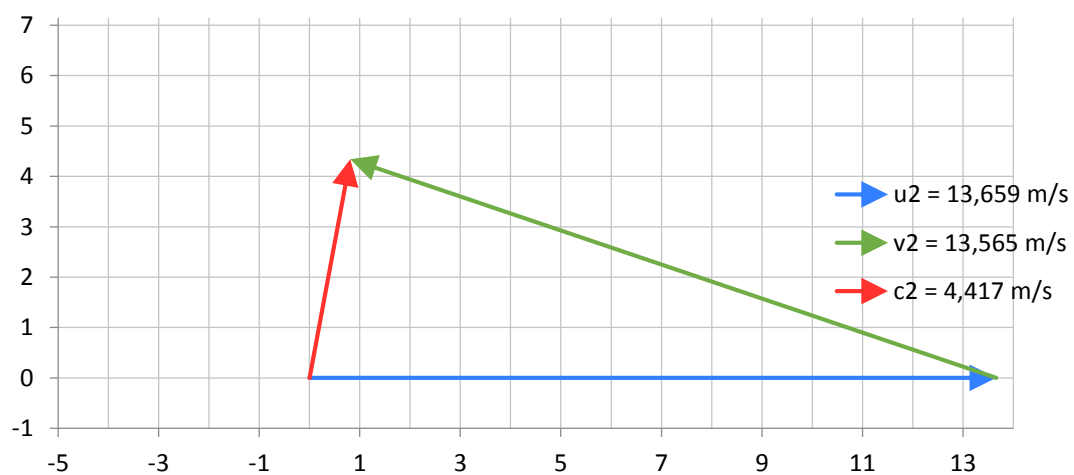
**1. varianta (původní)  $H = 3$  m -  $n_{11}$  MIN****1. varianta (původní)  $H = 3$  m -  $\eta$  MAX****1. varianta (původní)  $H = 3$  m -  $n_{11}$  MAX**

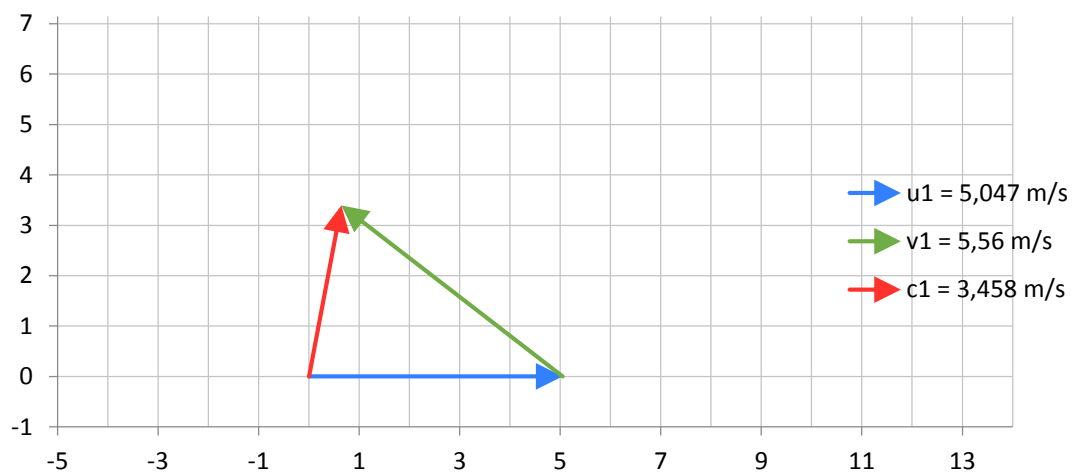
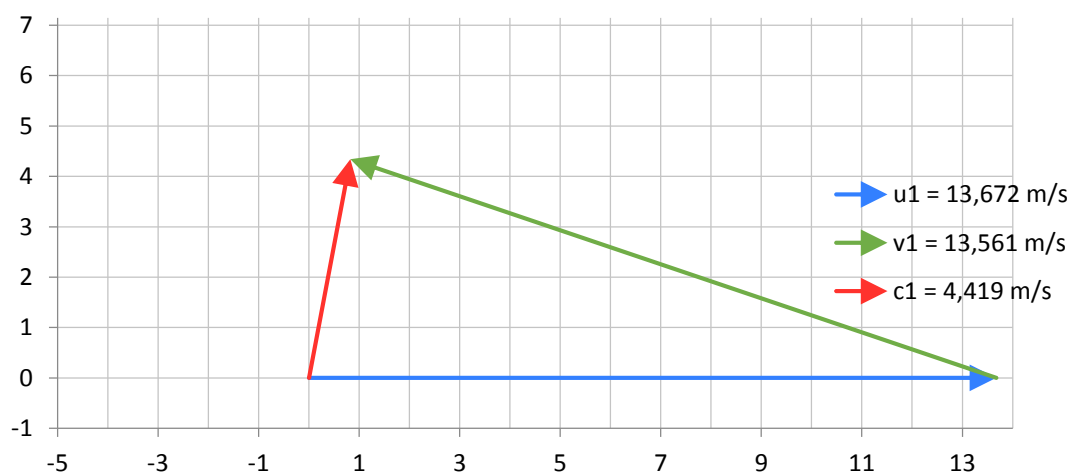
**1. varianta (původní)  $H = 4\text{ m}$  -  $n_{11}\text{ MIN}$** **1. varianta (původní)  $H = 4\text{ m}$  -  $\eta\text{ MAX}$** **1. varianta (původní)  $H = 4\text{ m}$  -  $n_{11}\text{ MAX}$** 

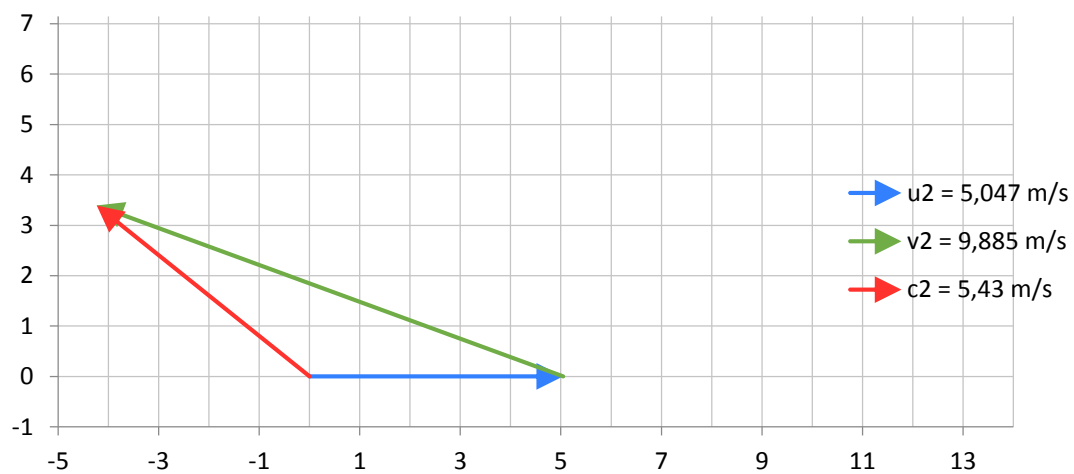
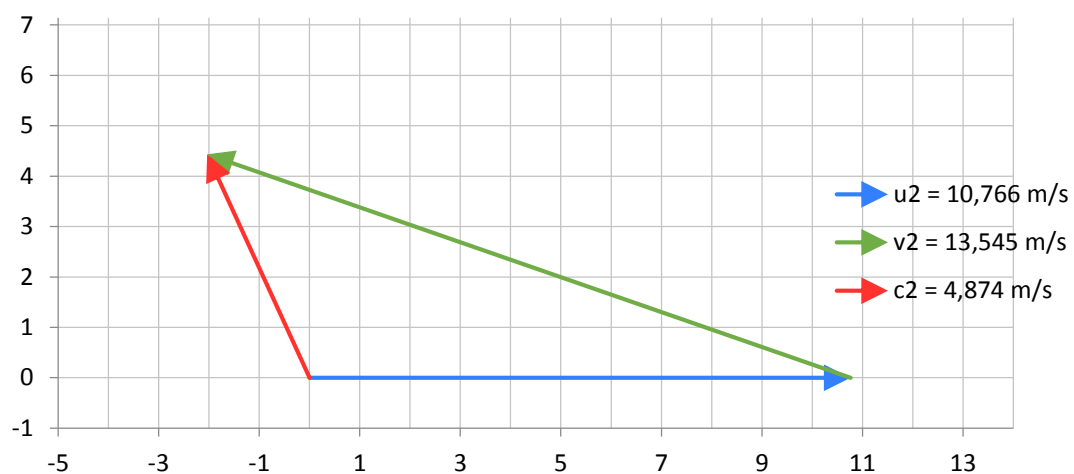
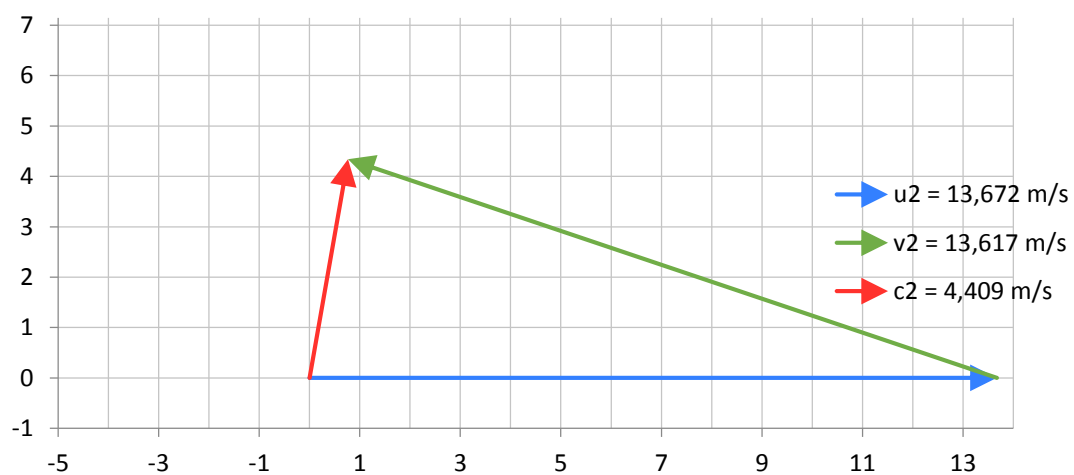
**1. varianta (původní)  $H = 4$  m -  $n_{11}$  MIN****1. varianta (původní)  $H = 4$  m -  $\eta$  MAX****1. varianta (původní)  $H = 4$  m -  $n_{11}$  MAX**

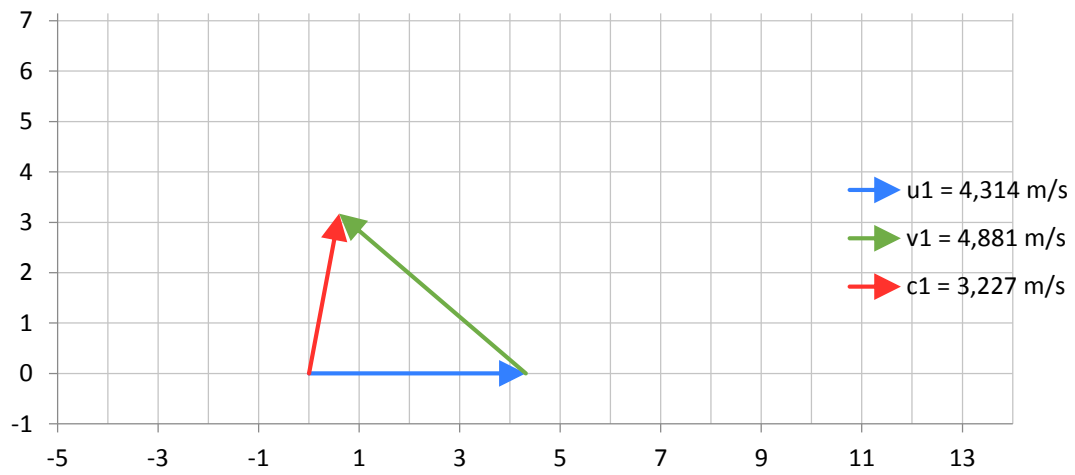
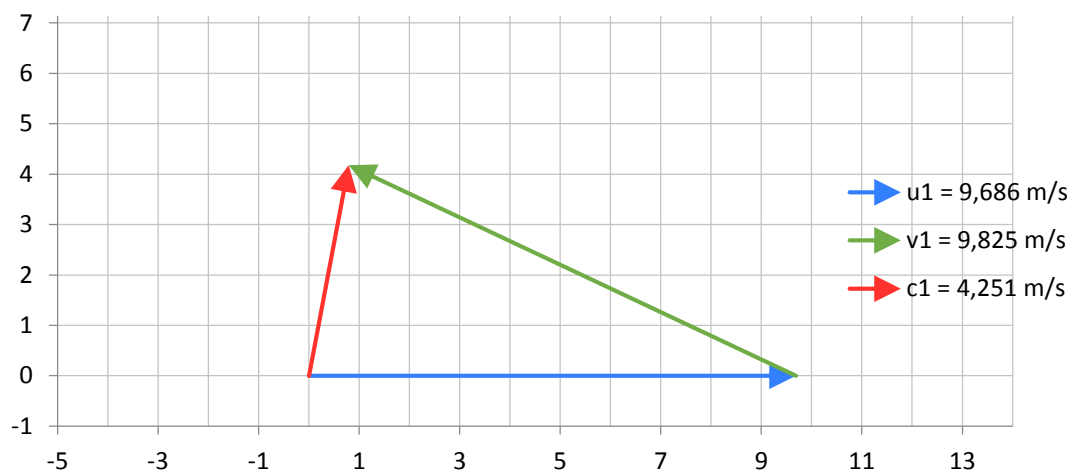
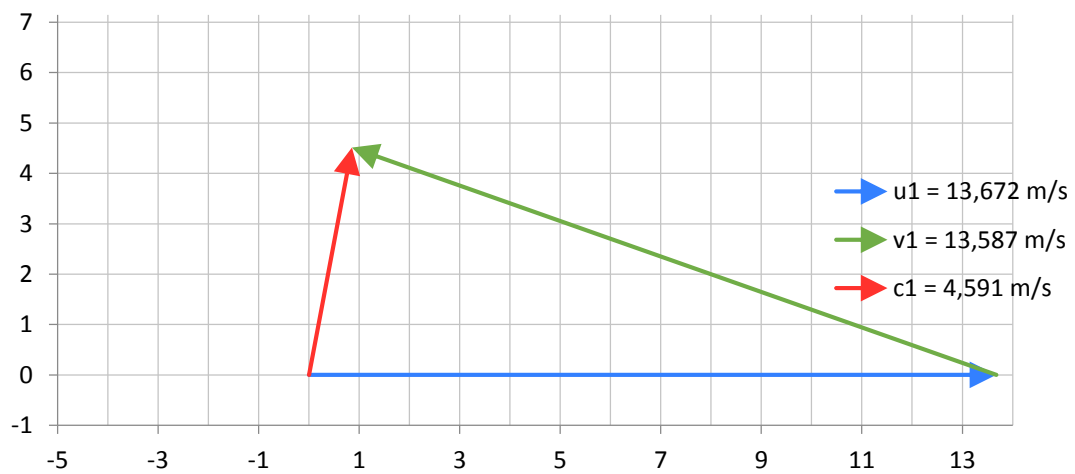
**2. varianta H = 3 m -  $\eta_{11}$  MIN****2. varianta H = 3 m -  $\eta$  MAX****2. varianta H = 3 m -  $\eta_{11}$  MAX**

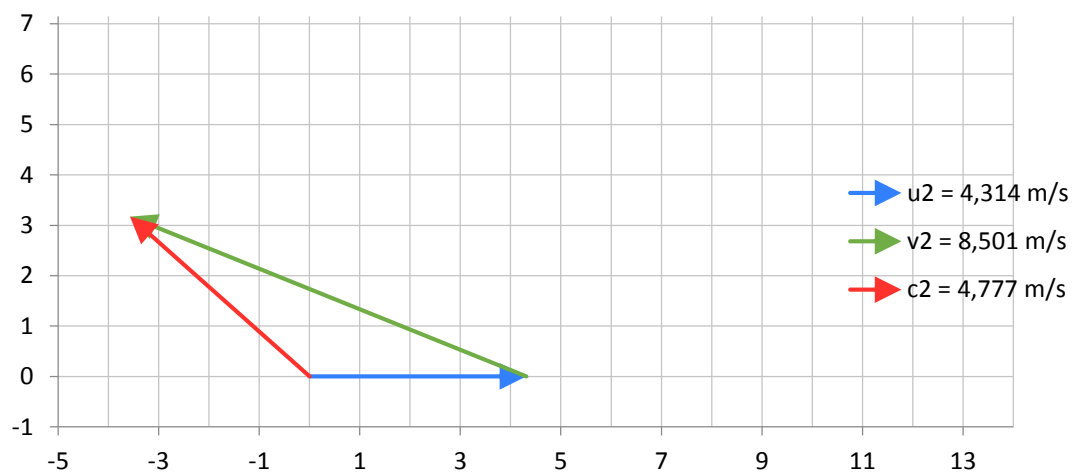
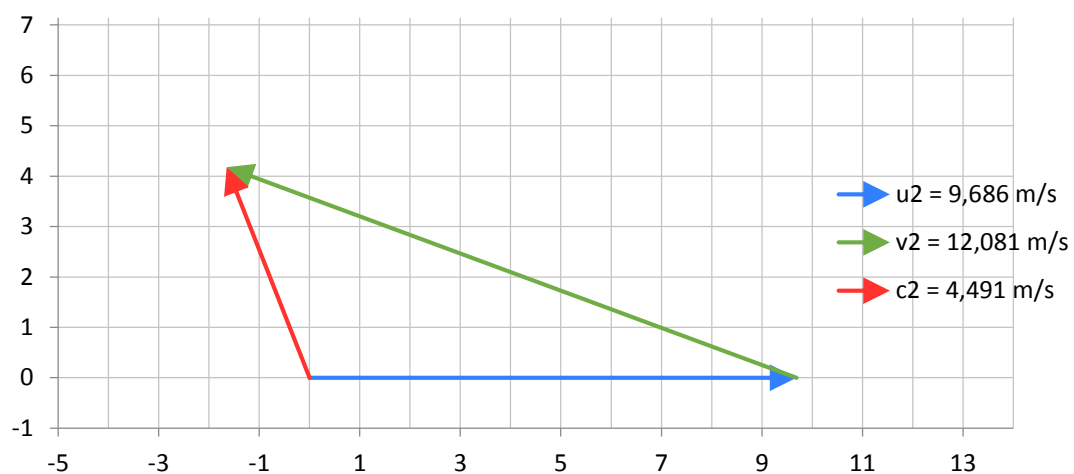
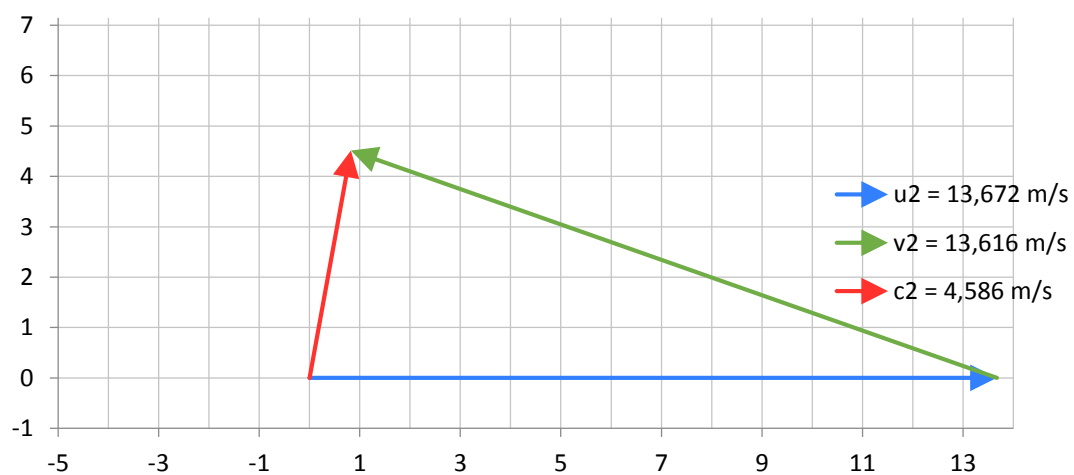


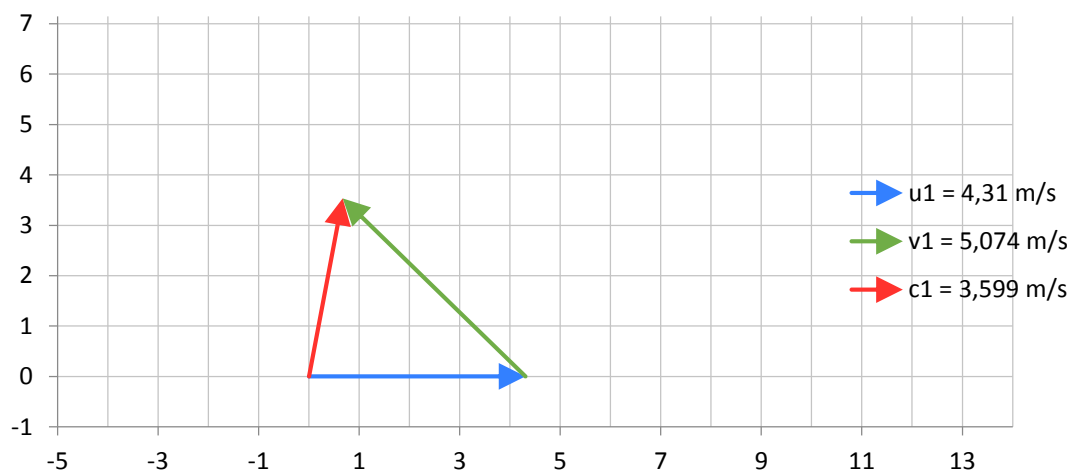
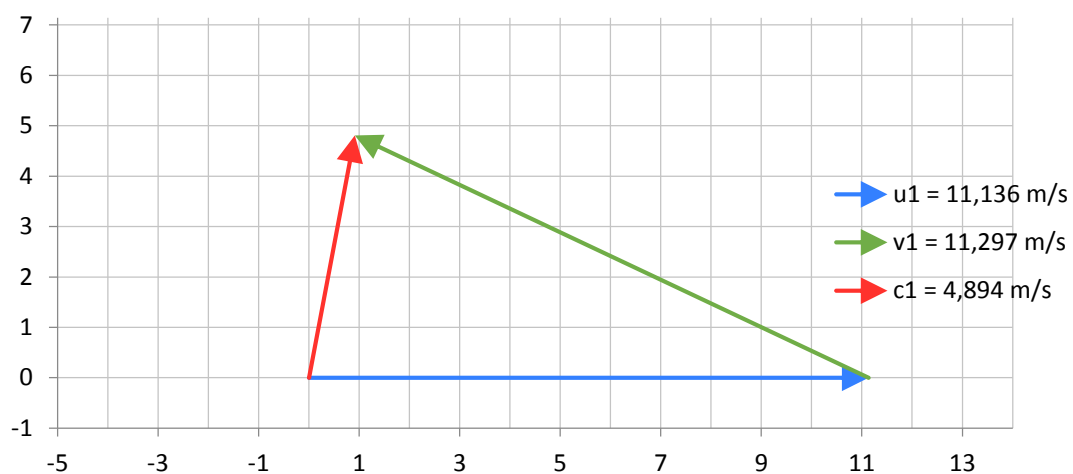
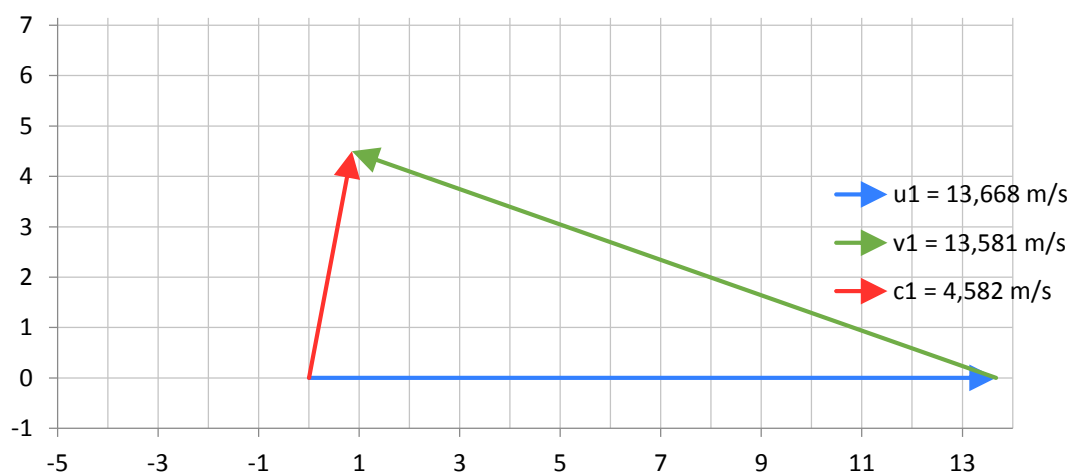
**2. varianta  $H = 3\text{ m} - \eta_{11}\text{ MIN}$** **2. varianta  $H = 3\text{ m} - \eta\text{ MAX}$** **2. varianta  $H = 3\text{ m} - \eta_{11}\text{ MAX}$** 

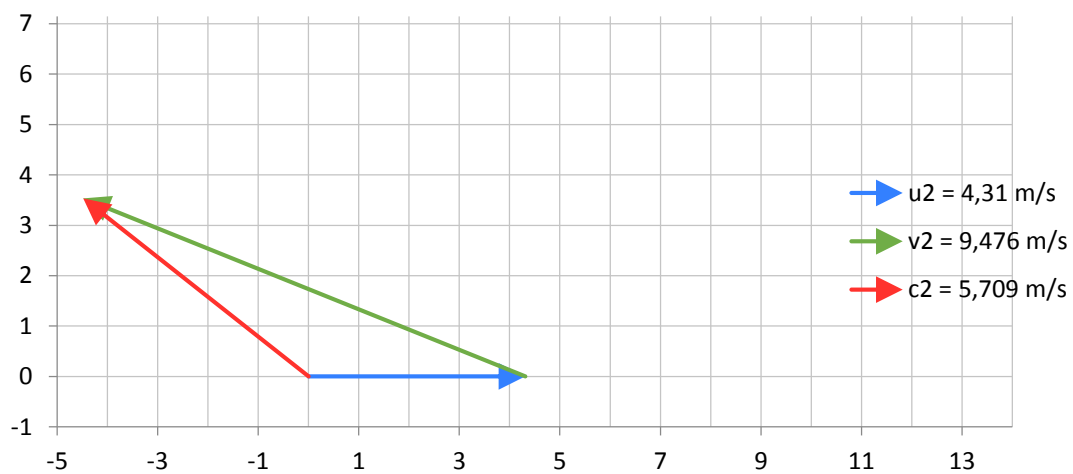
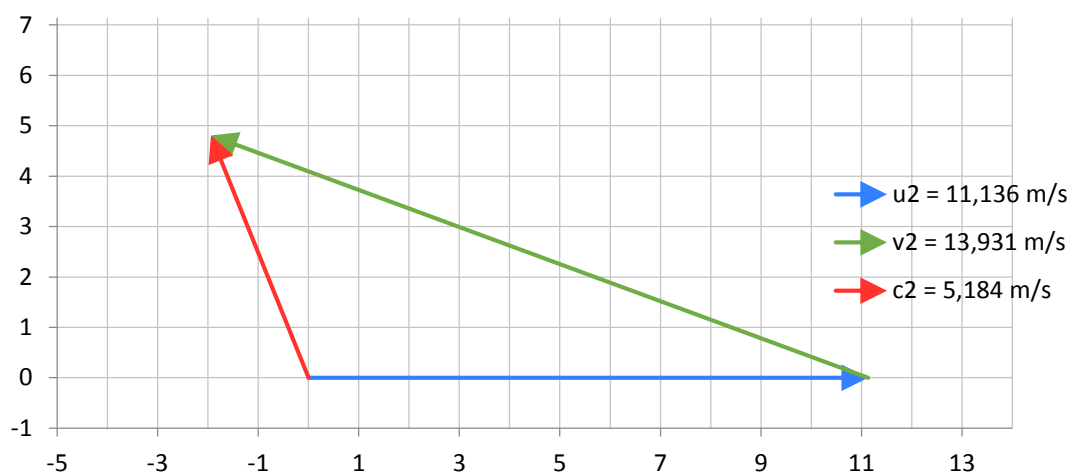
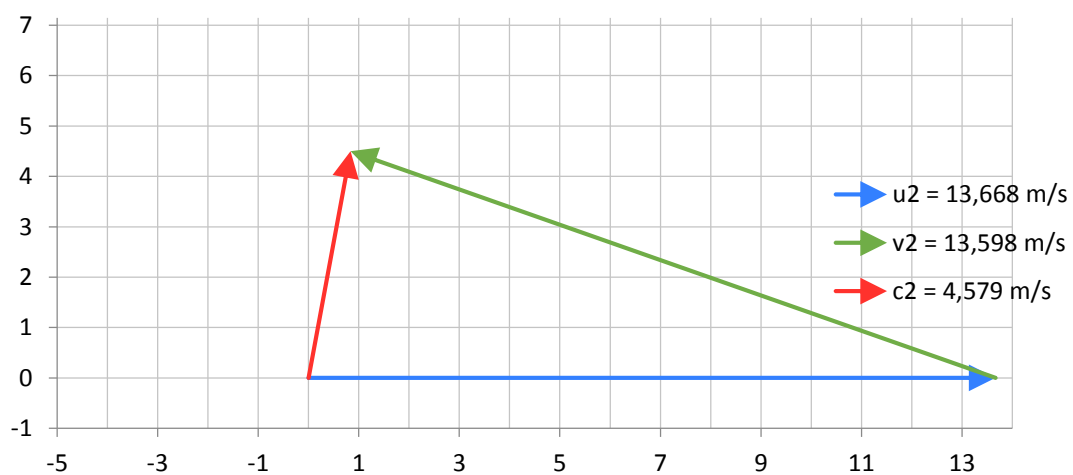
**2. varianta  $H = 4\text{ m}$  -  $\eta_{11}$  MIN****2. varianta  $H = 4\text{ m}$  -  $\eta$  MAX****2. varianta  $H = 4\text{ m}$  -  $\eta_{11}$  MAX**

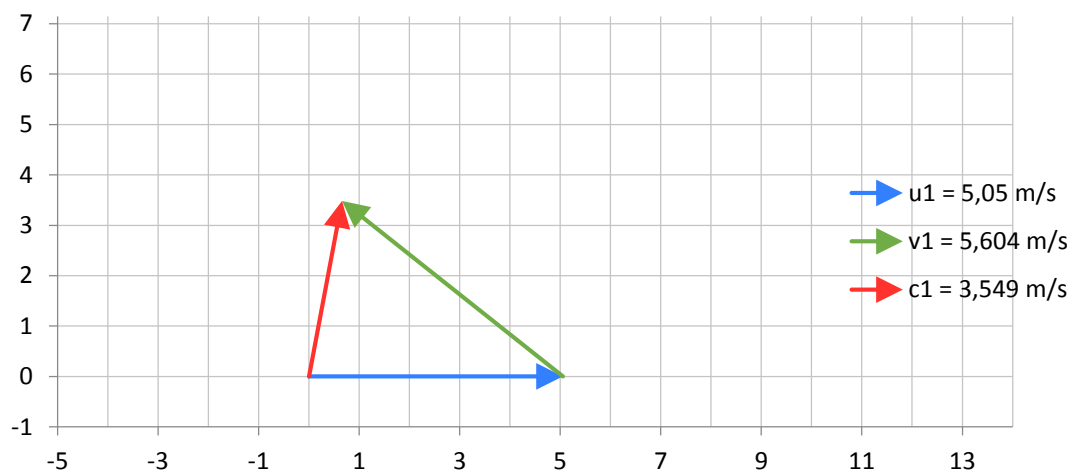
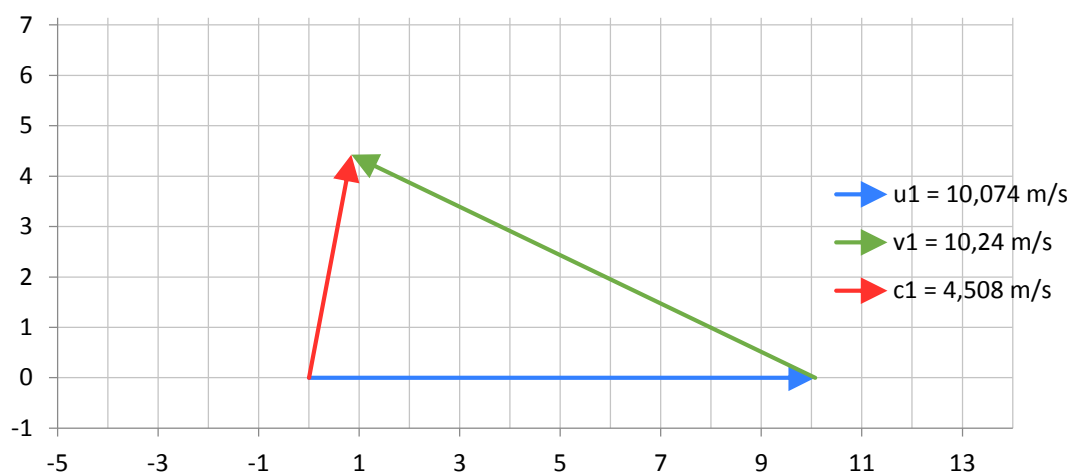
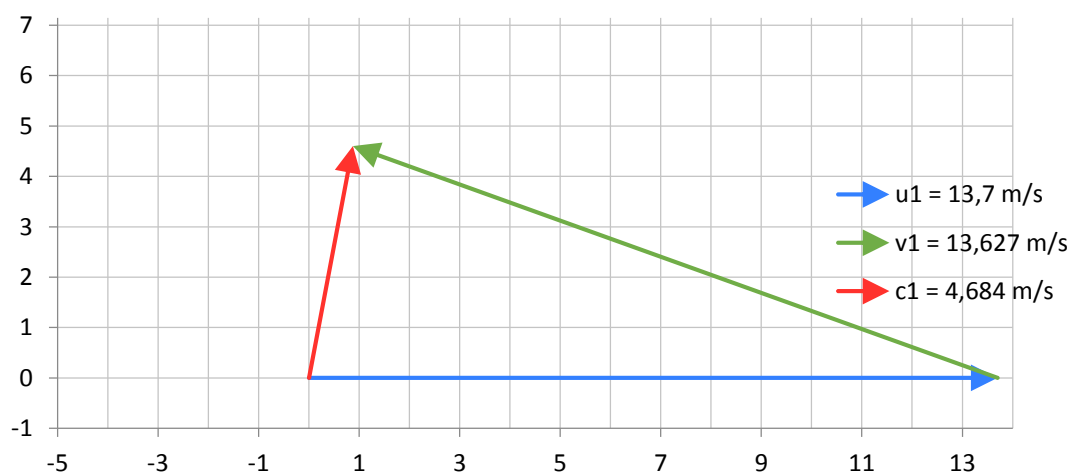
**2. varianta H = 4 m -  $\eta_{11}$  MIN****2. varianta H = 4 m -  $\eta$  MAX****2. varianta H = 4 m -  $\eta_{11}$  MAX**

**3. varianta H = 3 m -  $\eta_{11}$  MIN****3. varianta H = 3 m -  $\eta$  MAX****3. varianta H = 3 m -  $\eta_{11}$  MAX**

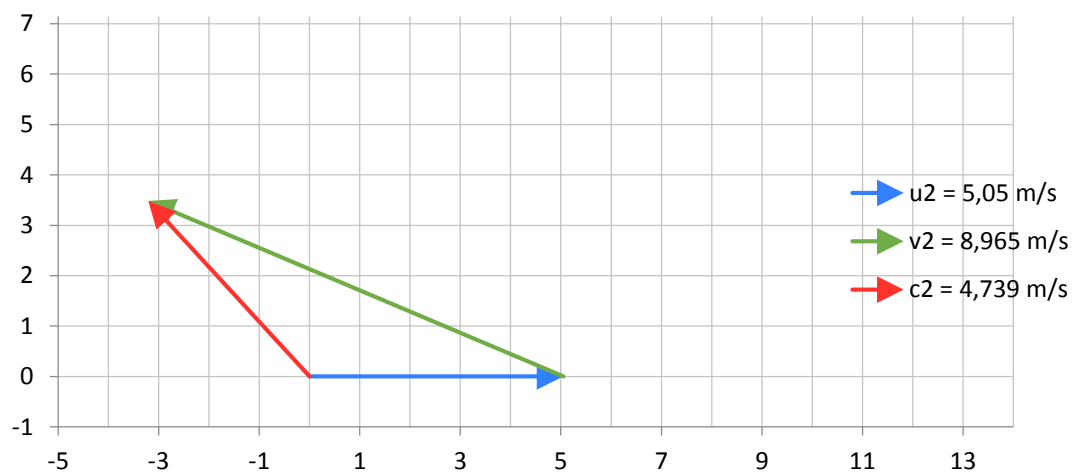
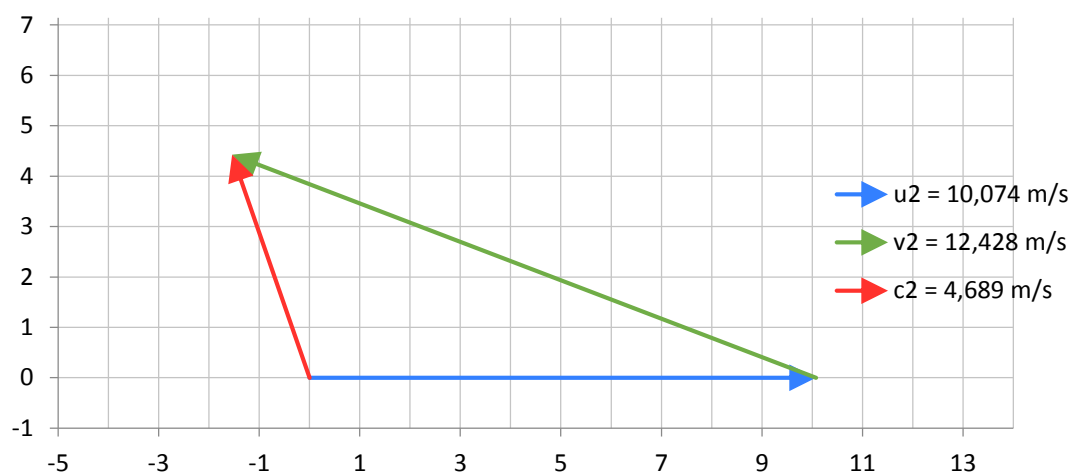
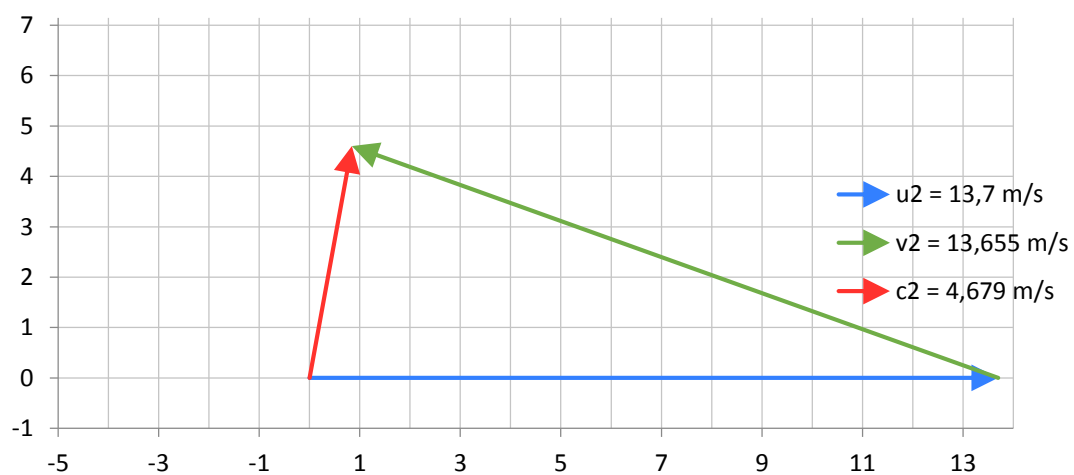
**3. varianta H = 3 m -  $\eta_{11}$  MIN****3. varianta H = 3 m -  $\eta$  MAX****3. varianta H = 3 m -  $\eta_{11}$  MAX**

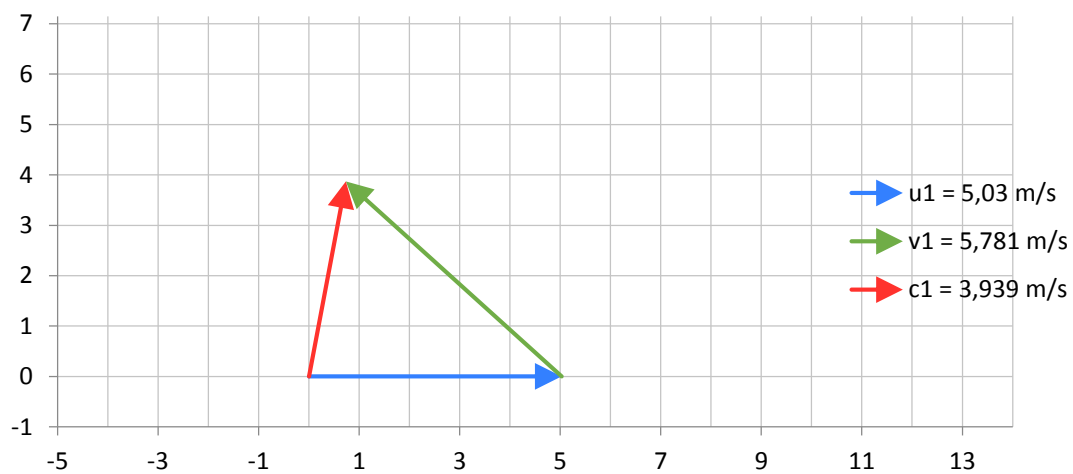
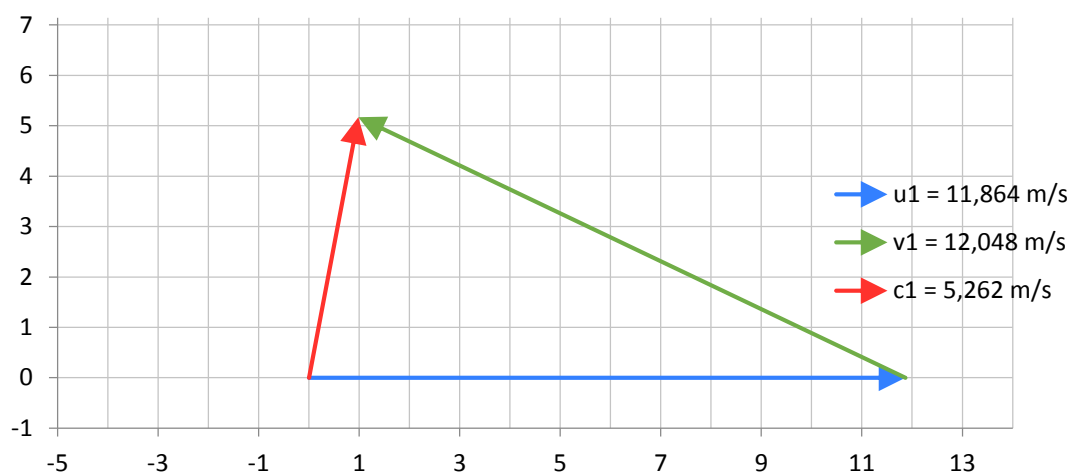
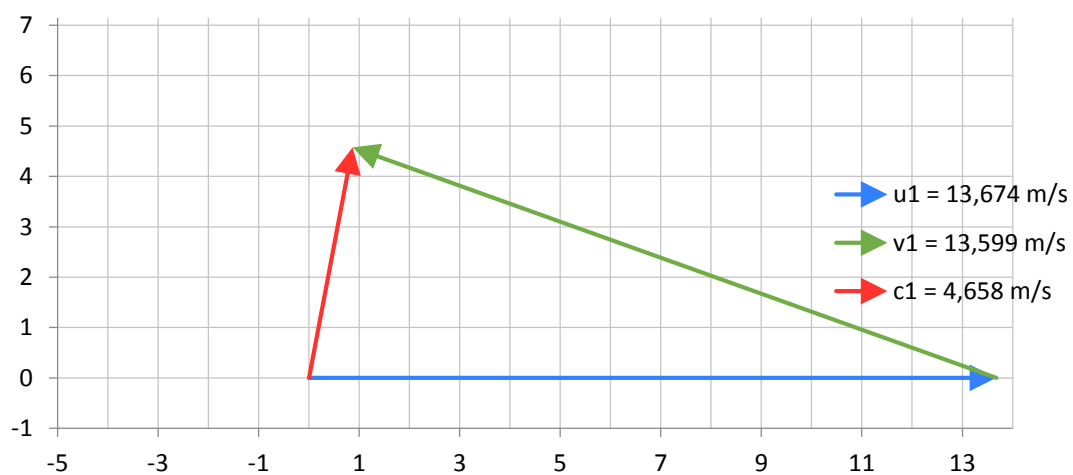
**3.varianta H = 4 m -  $\eta_{11}$  MIN****3.varianta H = 4 m -  $\eta$  MAX****3.varianta H = 4 m -  $\eta_{11}$  MAX**

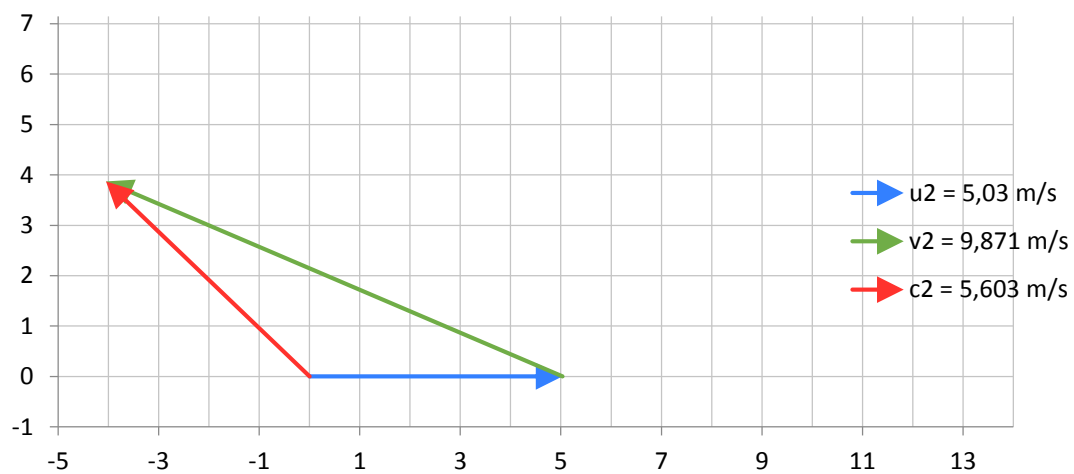
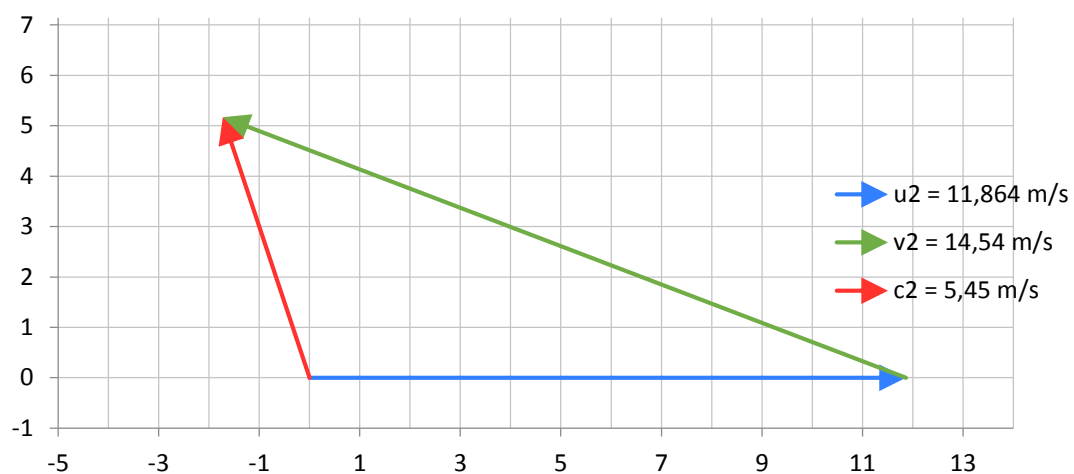
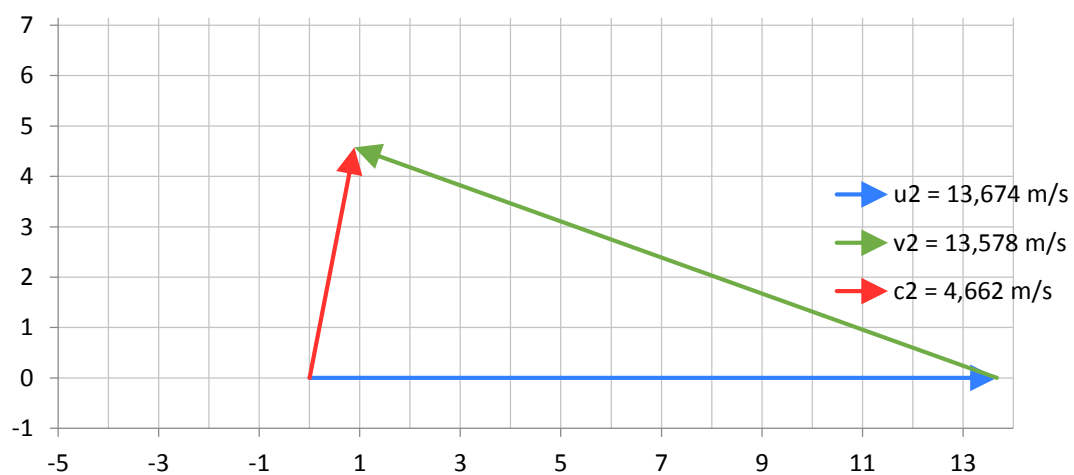
**3.varianta H = 4 m -  $n_{11}$  MIN****3.varianta H = 4 m -  $\eta$  MAX****3.varianta H = 4 m -  $n_{11}$  MAX**

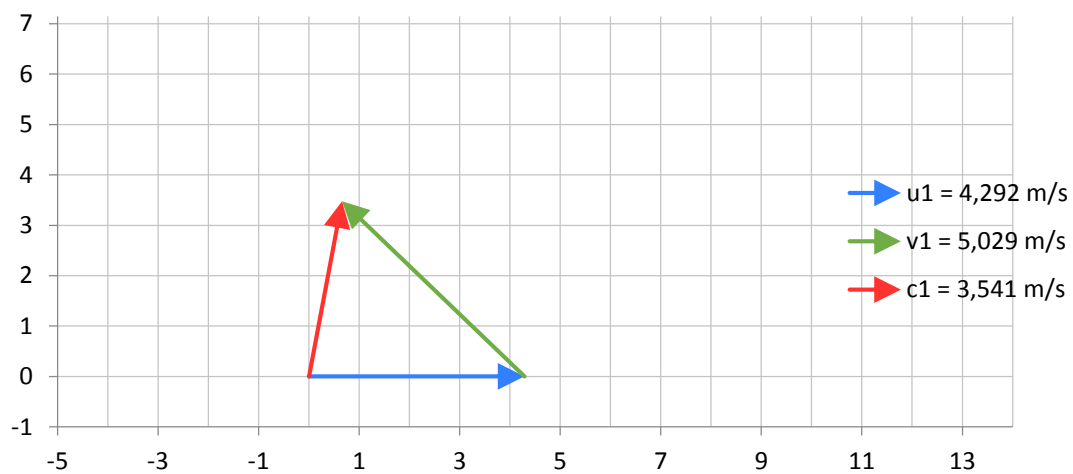
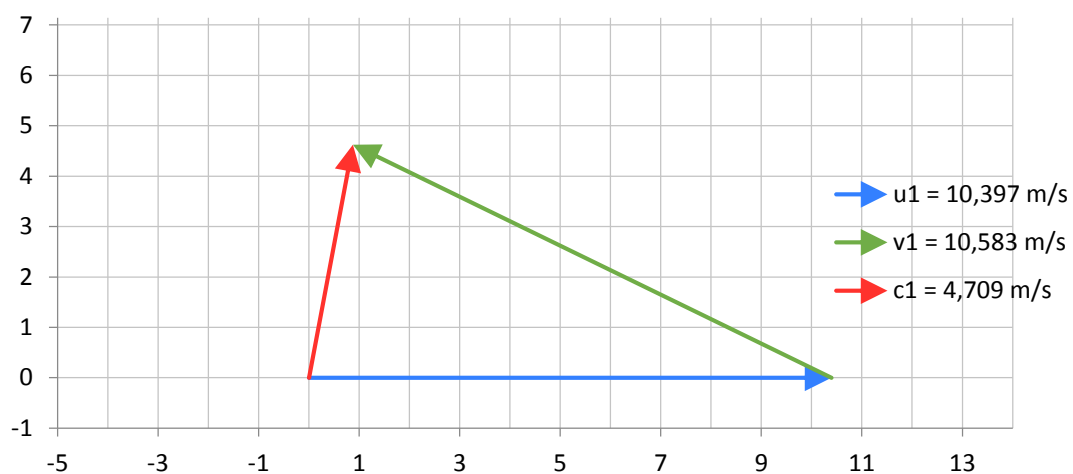
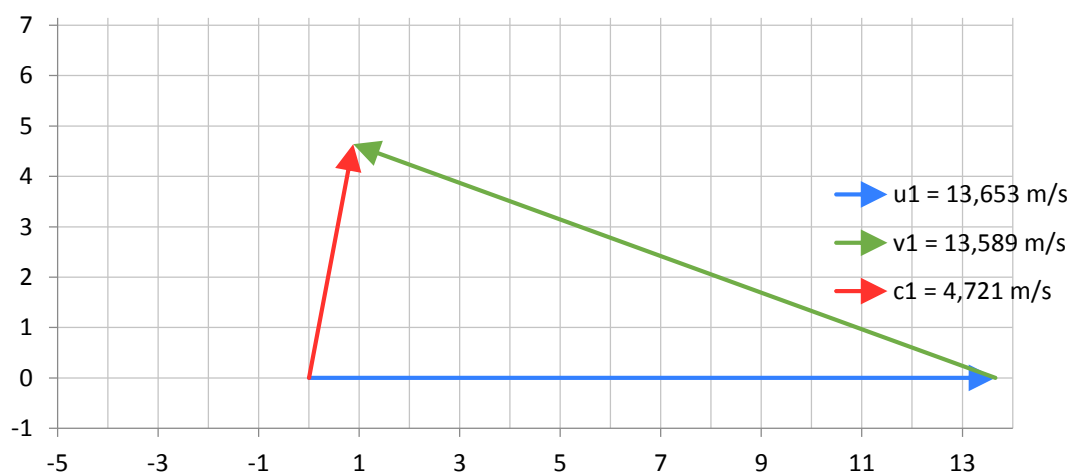
**4. varianta  $H = 3$  m -  $\eta_{11}$  MIN****4. varianta  $H = 3$  m -  $\eta$  MAX****4. varianta  $H = 3$  m -  $\eta_{11}$  MAX**

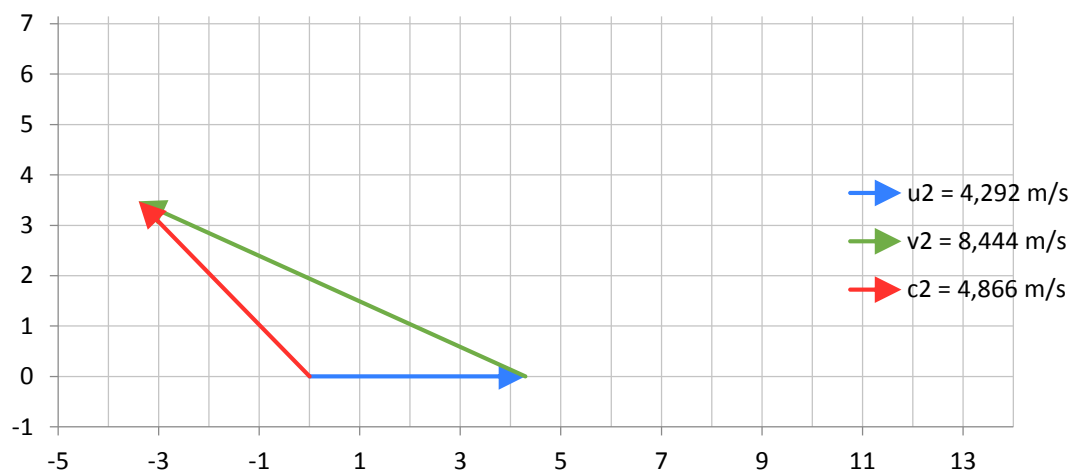
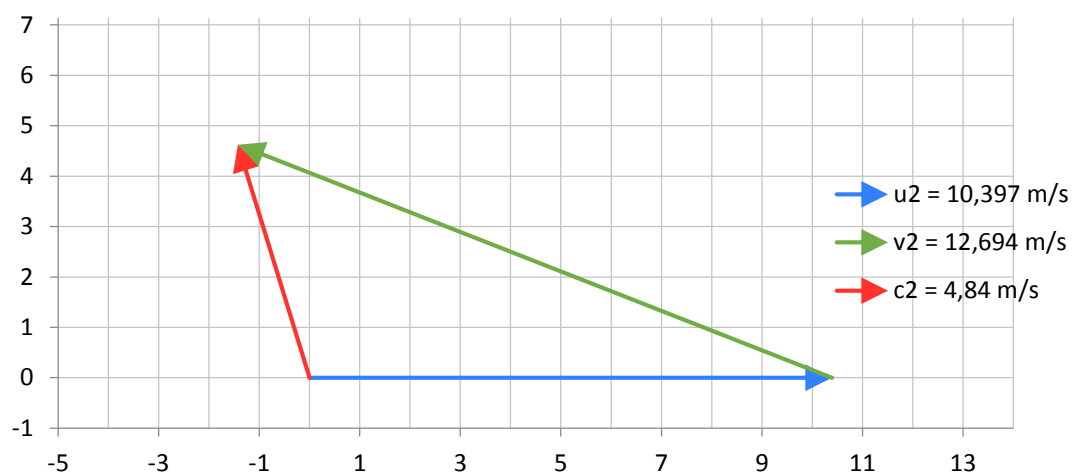
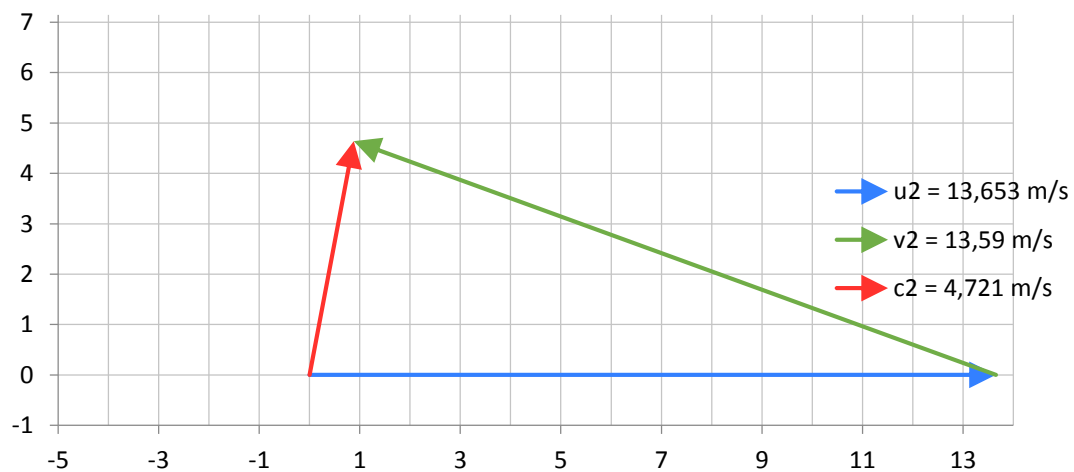


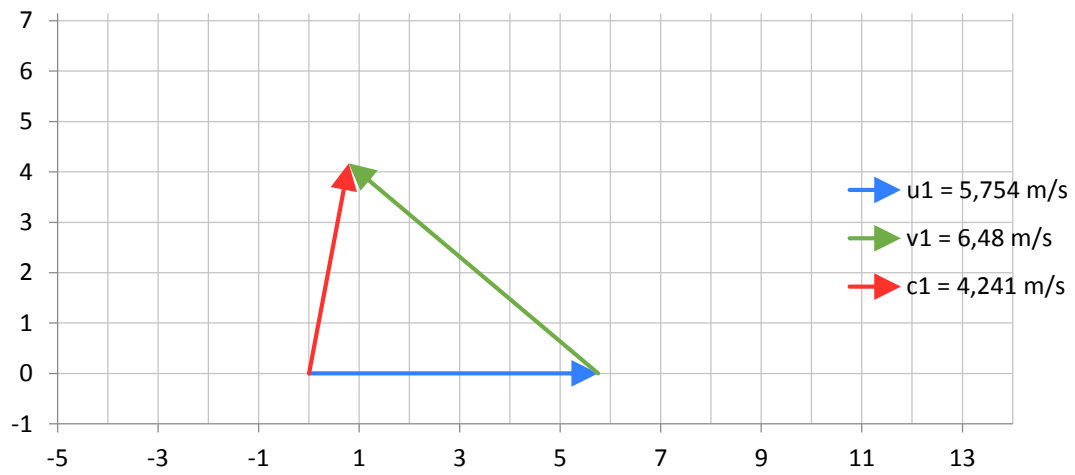
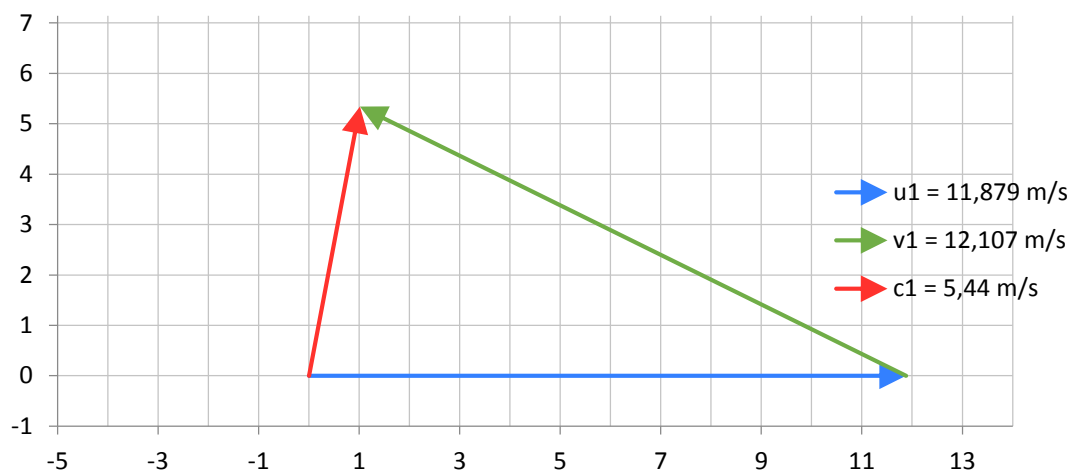
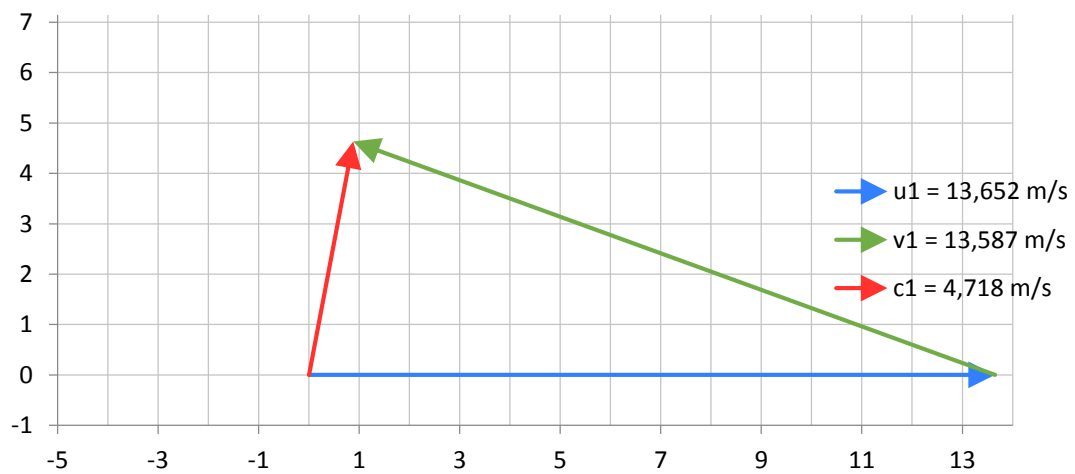
**4. varianta  $H = 3$  m -  $\eta_{11}$  MIN****4. varianta  $H = 3$  m -  $\eta$  MAX****4. varianta  $H = 3$  m -  $\eta_{11}$  MAX**

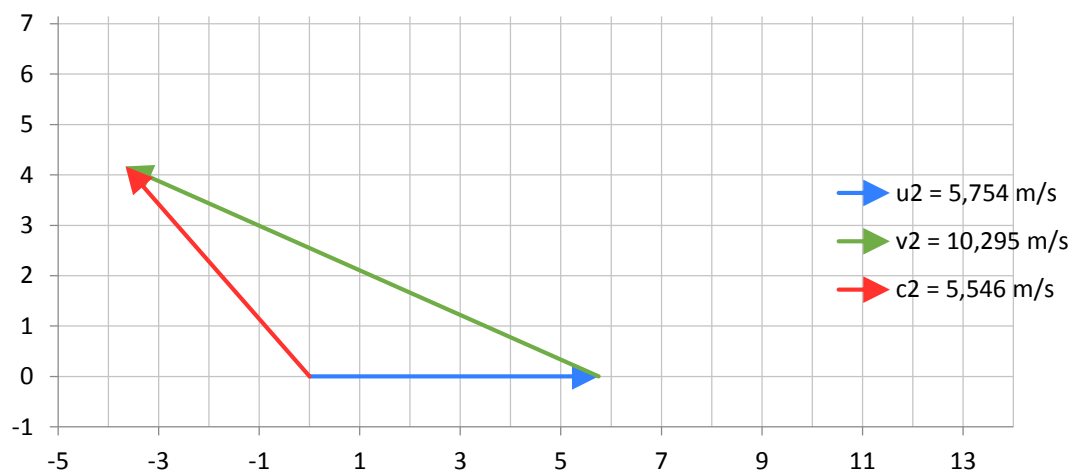
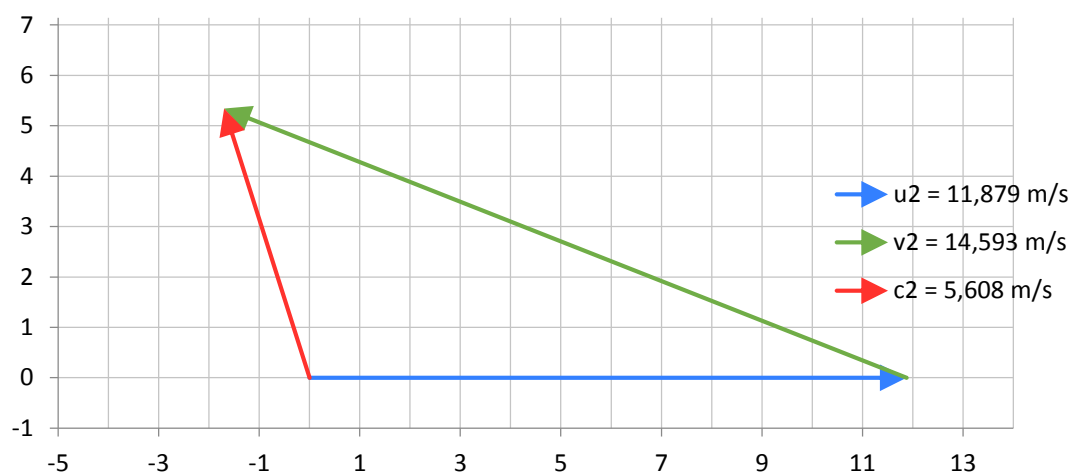
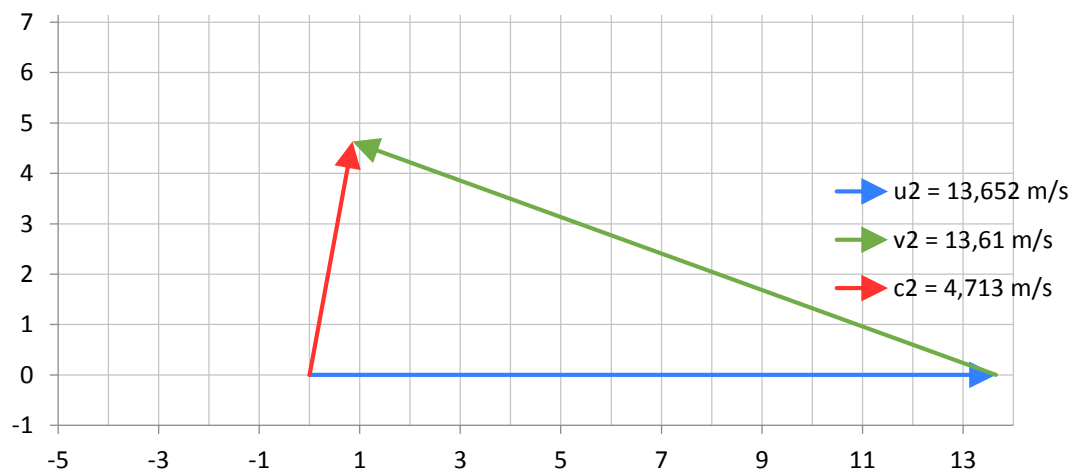
**4. varianta  $H = 4$  m -  $\eta_{11}$  MIN****4. varianta  $H = 4$  m -  $\eta$  MAX****4. varianta  $H = 4$  m -  $\eta_{11}$  MAX**

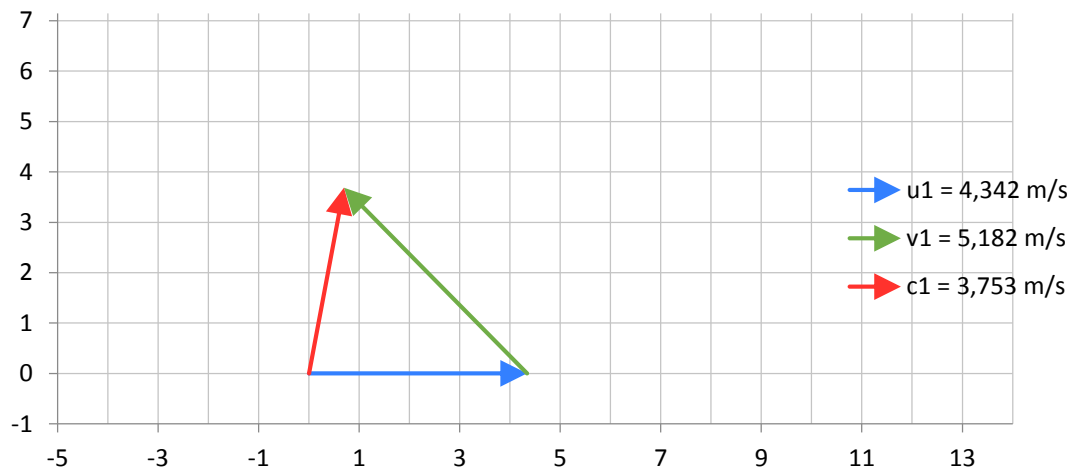
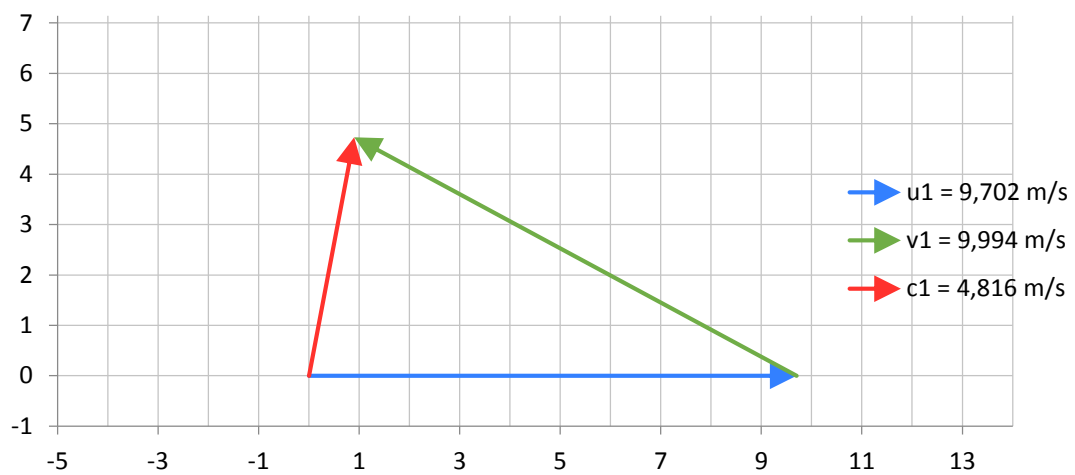
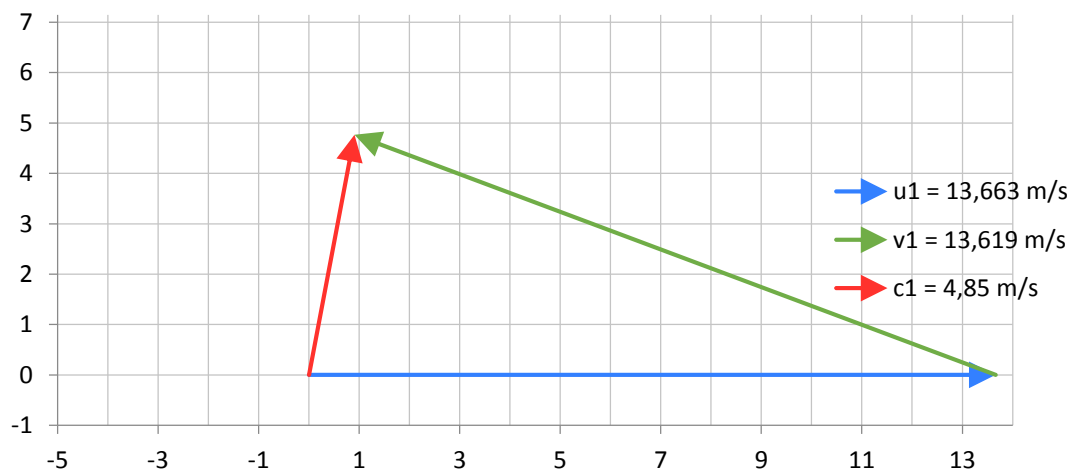
**4. varianta  $H = 4$  m -  $\eta_{11}$  MIN****4. varianta  $H = 4$  m -  $\eta$  MAX****4. varianta  $H = 4$  m -  $\eta_{11}$  MAX**

**5. varianta H = 3 m -  $\eta_{11}$  MIN****5. varianta H = 3 m -  $\eta$  MAX****5. varianta H = 3 m -  $\eta_{11}$  MAX**

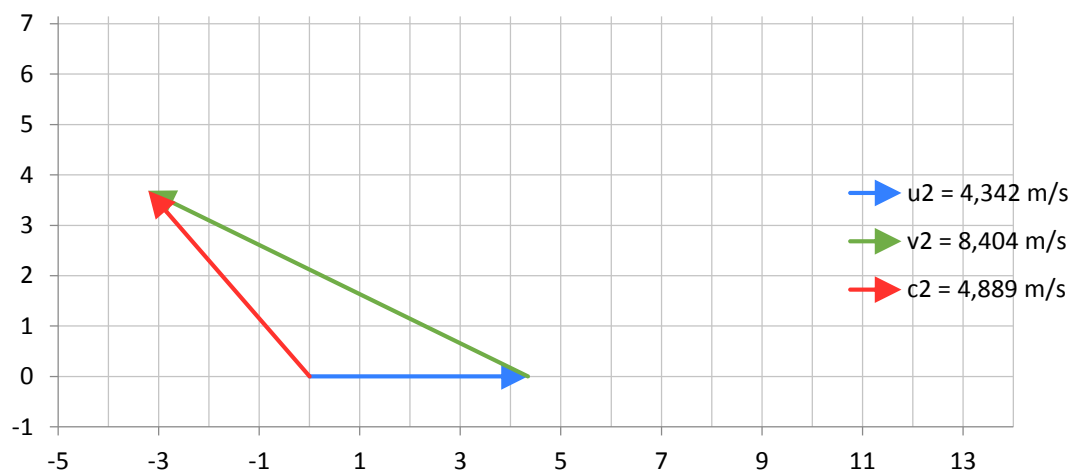
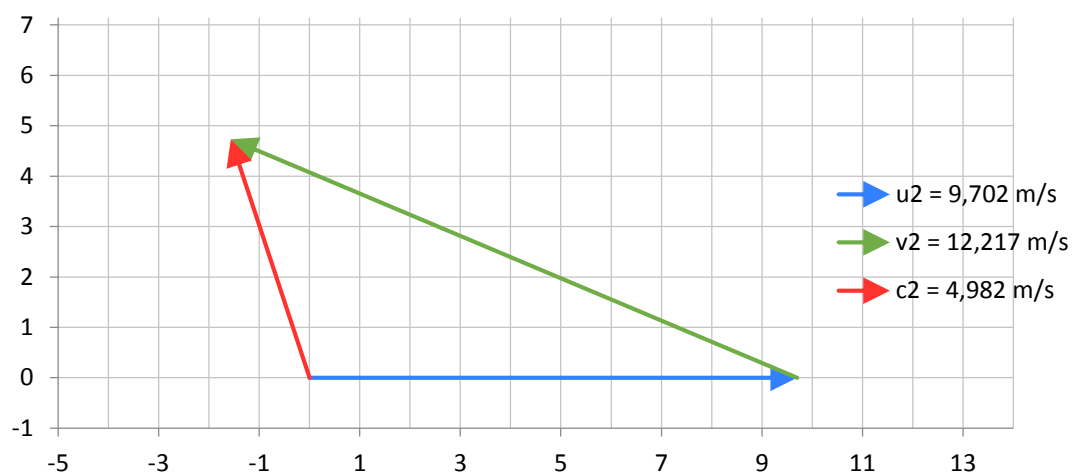
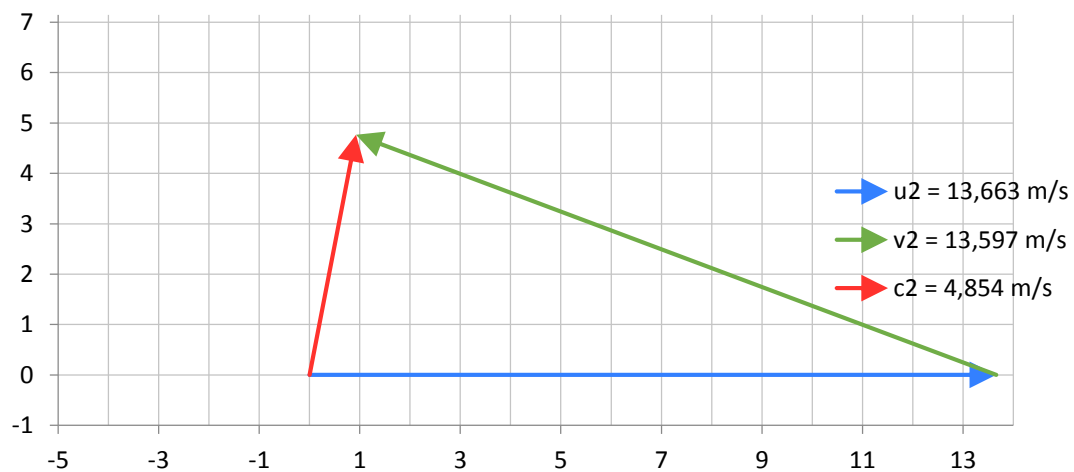
**5. varianta H = 3 m -  $\eta_{11}$  MIN****5. varianta H = 3 m -  $\eta$  MAX****5. varianta H = 3 m -  $\eta_{11}$  MAX**

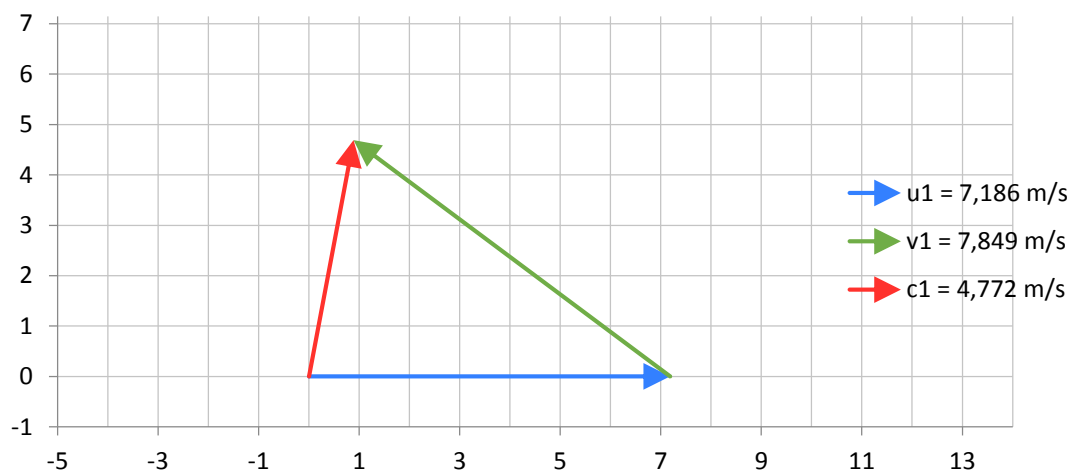
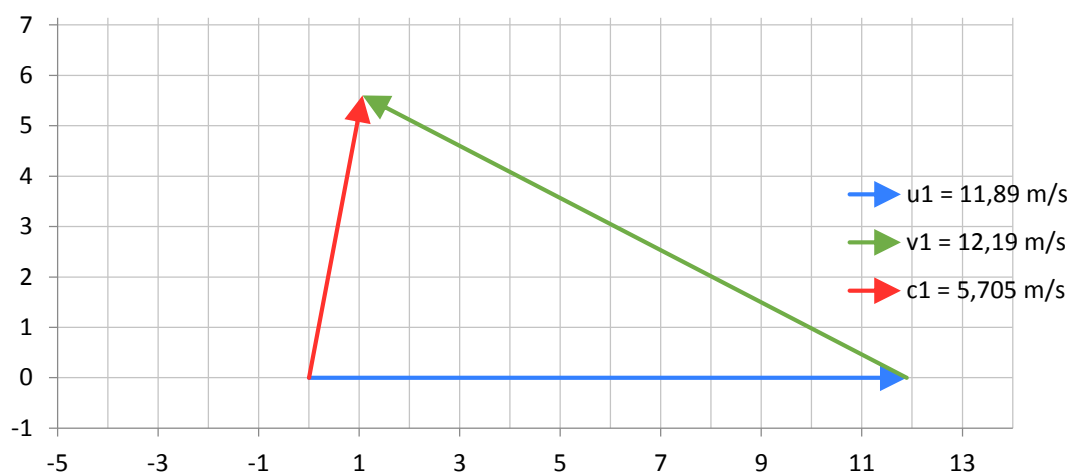
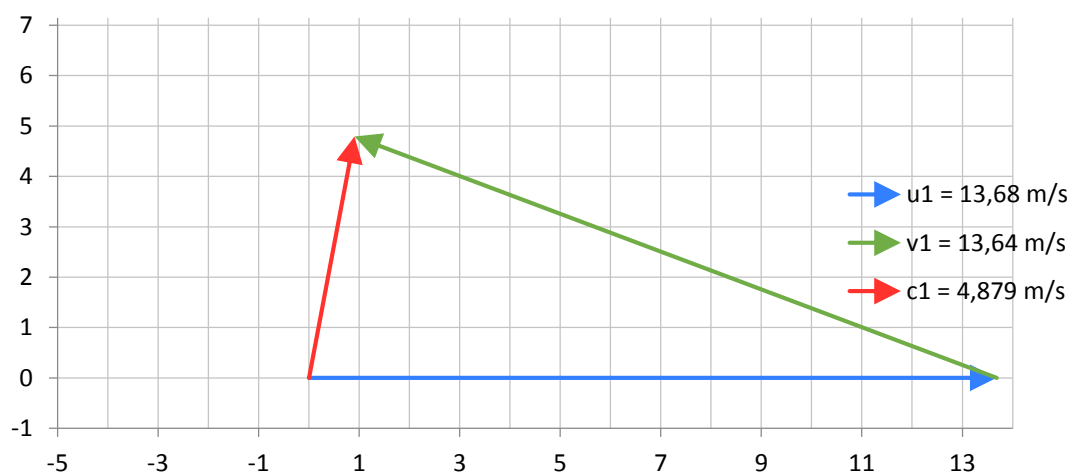
**5. varianta  $H = 4$  m -  $\eta_{11}$  MIN****5. varianta  $H = 4$  m -  $\eta$  MAX****5. varianta  $H = 4$  m -  $\eta_{11}$  MAX**

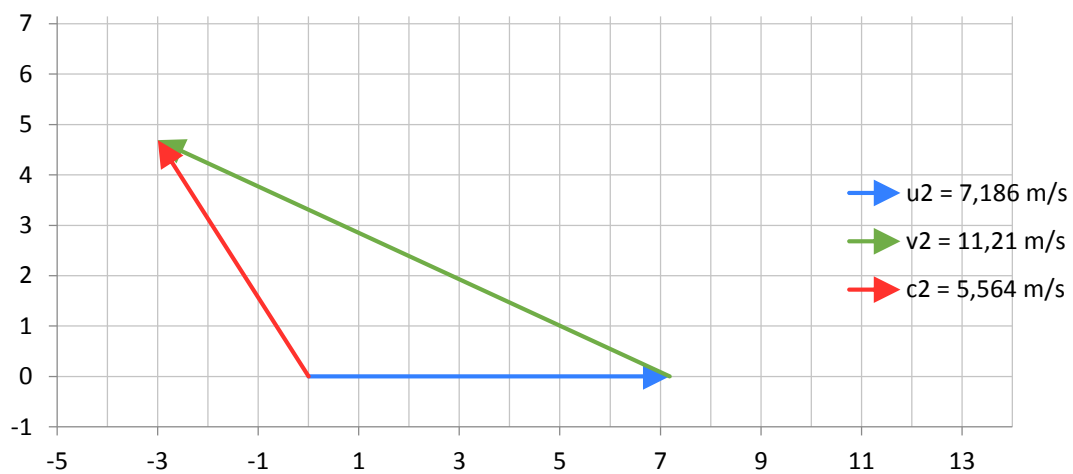
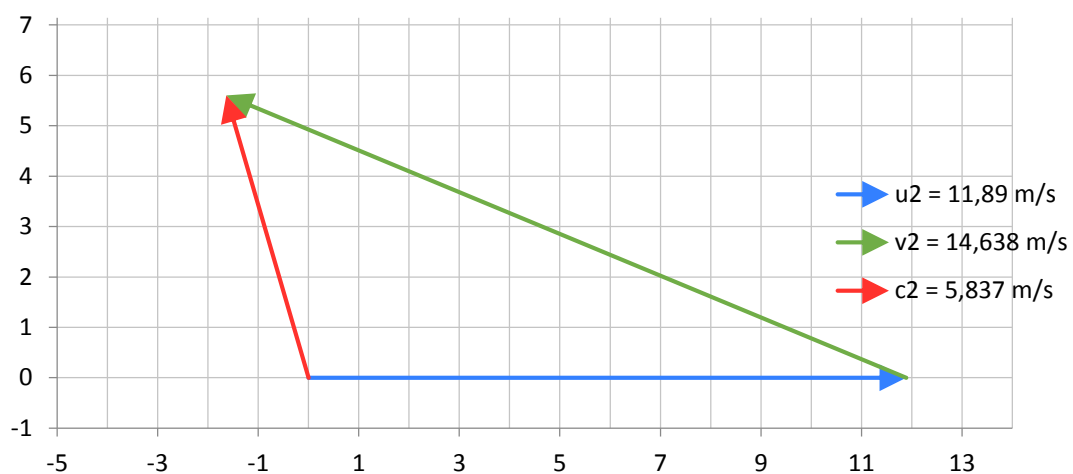
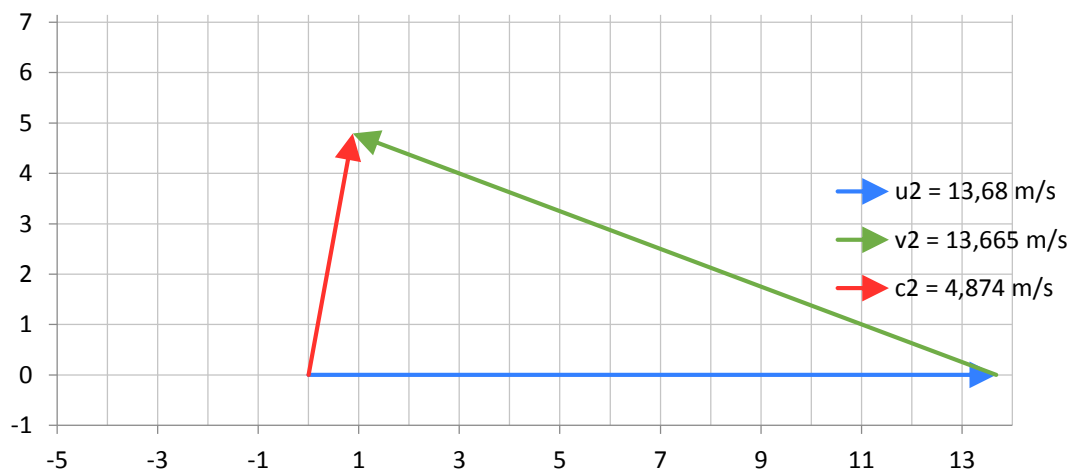
**5. varianta H = 4 m -  $\eta_{11}$  MIN****5. varianta H = 4 m -  $\eta$  MAX****5. varianta H = 4 m -  $\eta_{11}$  MAX**

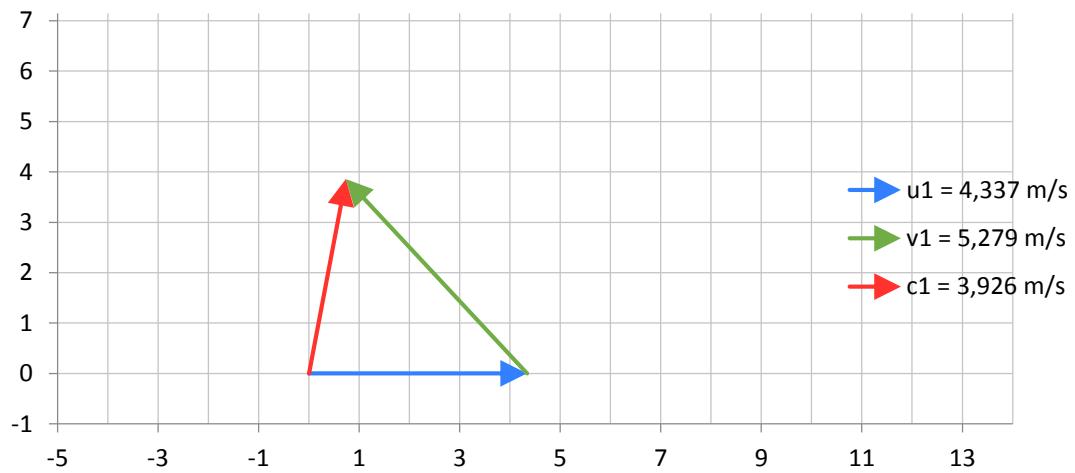
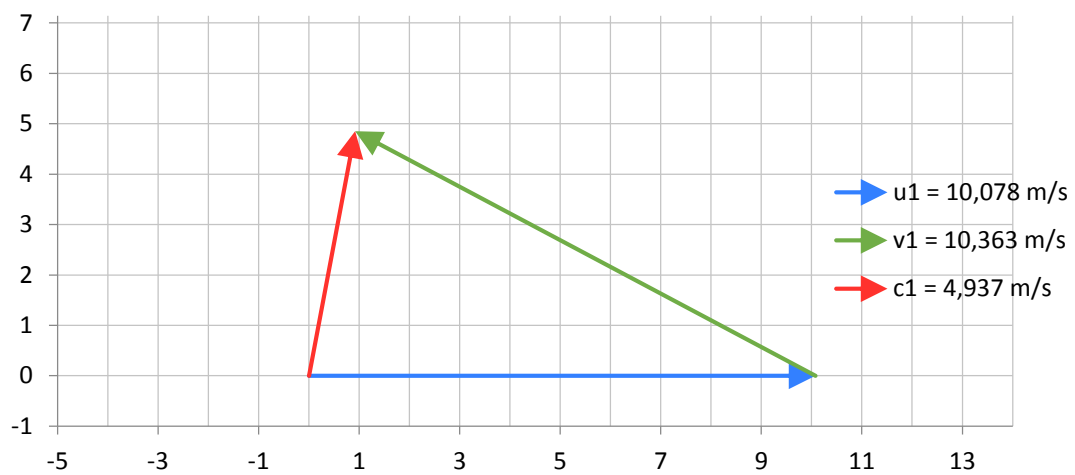
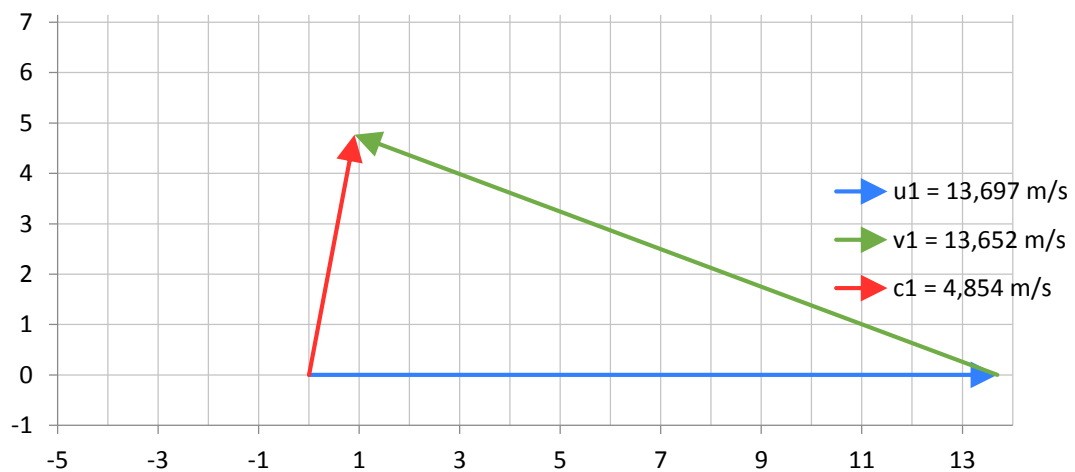
**6. varianta  $H = 3\text{ m}$  -  $\eta_{11}$  MIN****6. varianta  $H = 3\text{ m}$  -  $\eta$  MAX****6. varianta  $H = 3\text{ m}$  -  $\eta_{11}$  MAX**

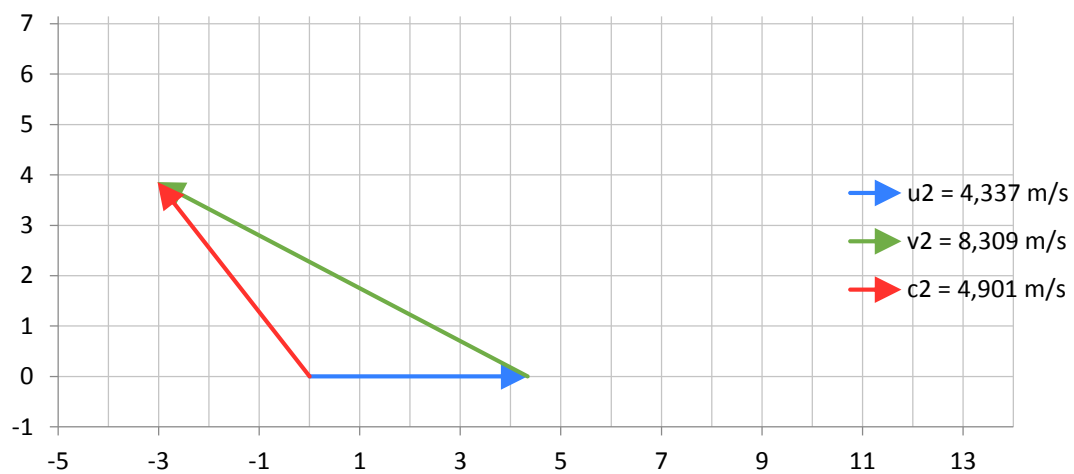
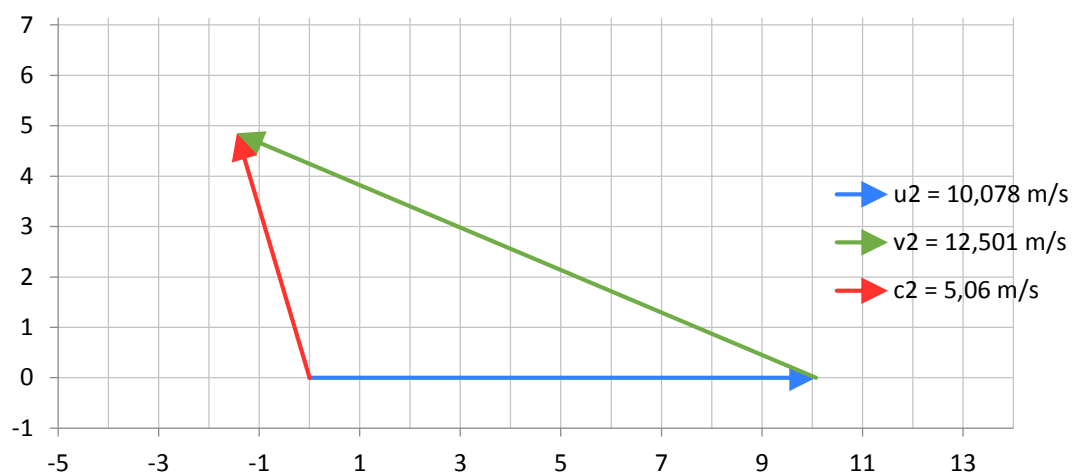
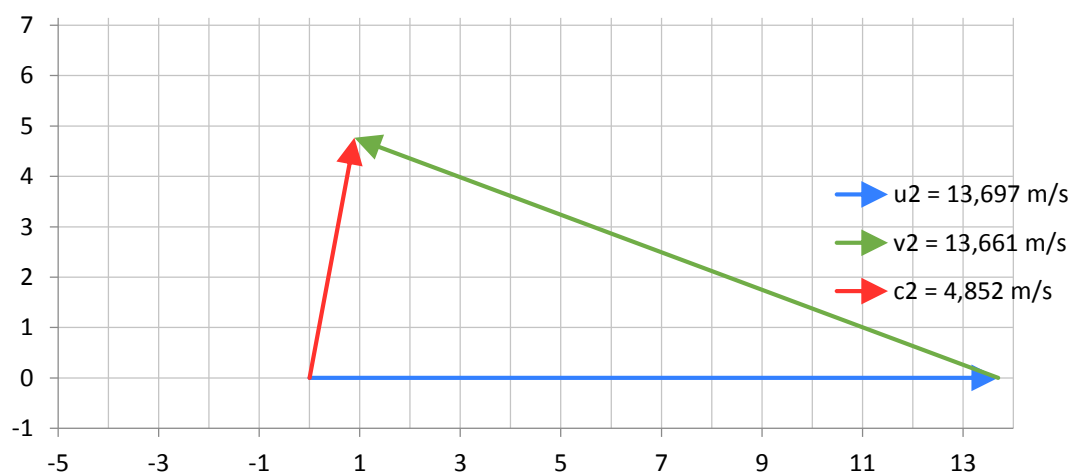


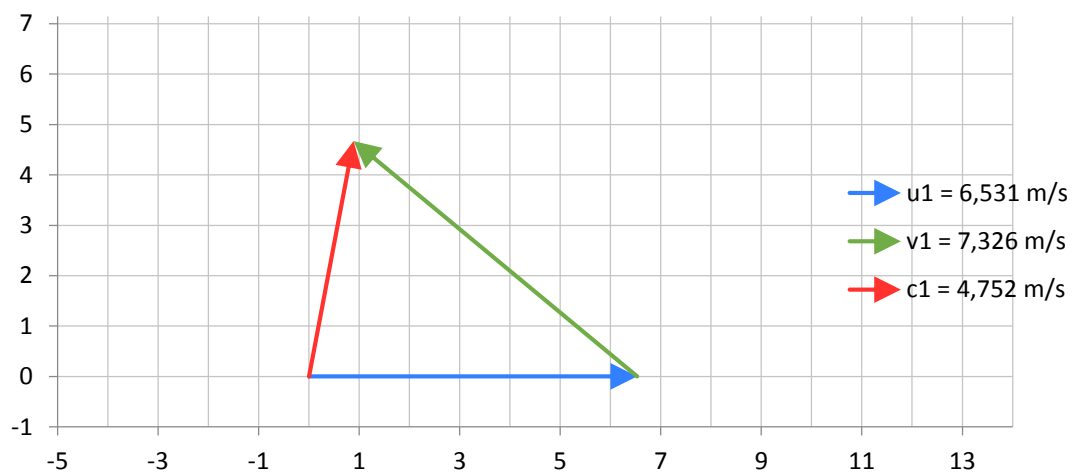
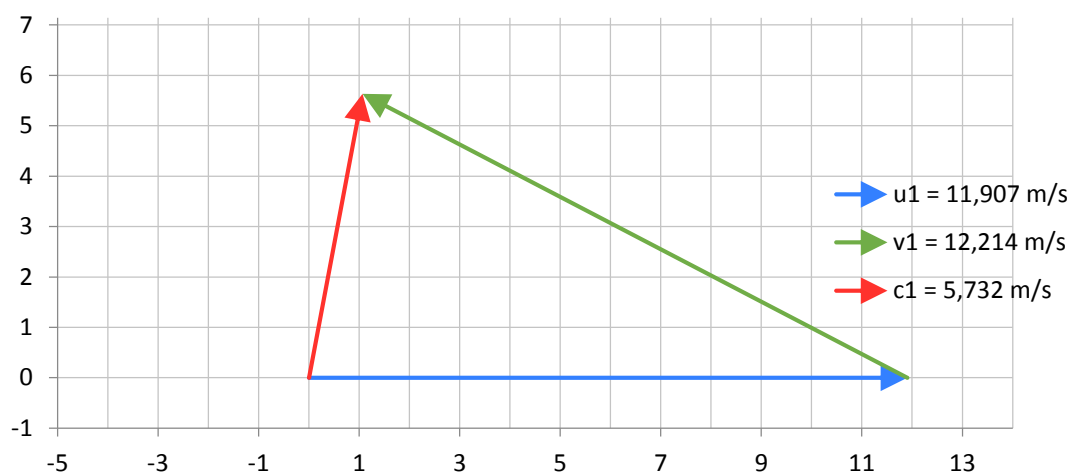
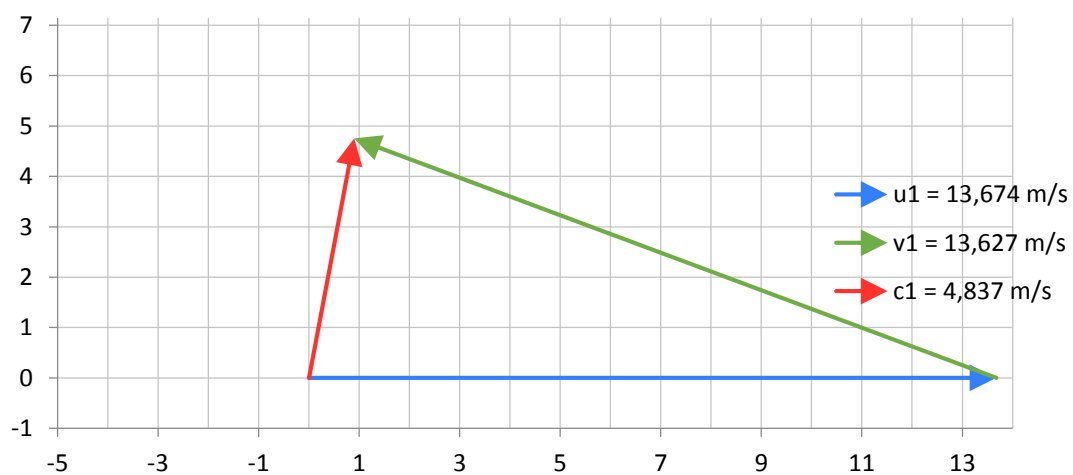
**6. varianta H = 3 m -  $\eta_{11}$  MIN****6. varianta H = 3 m -  $\eta$  MAX****6. varianta H = 3 m -  $\eta_{11}$  MAX**

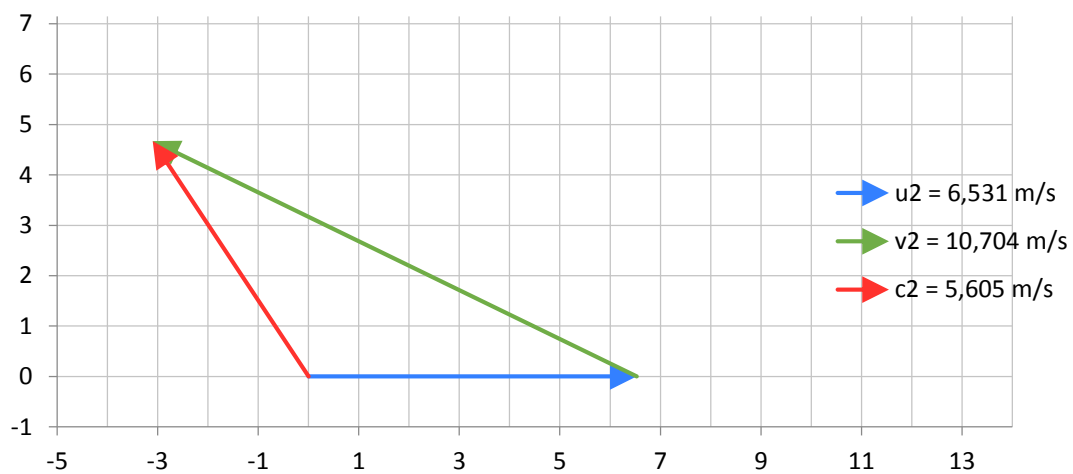
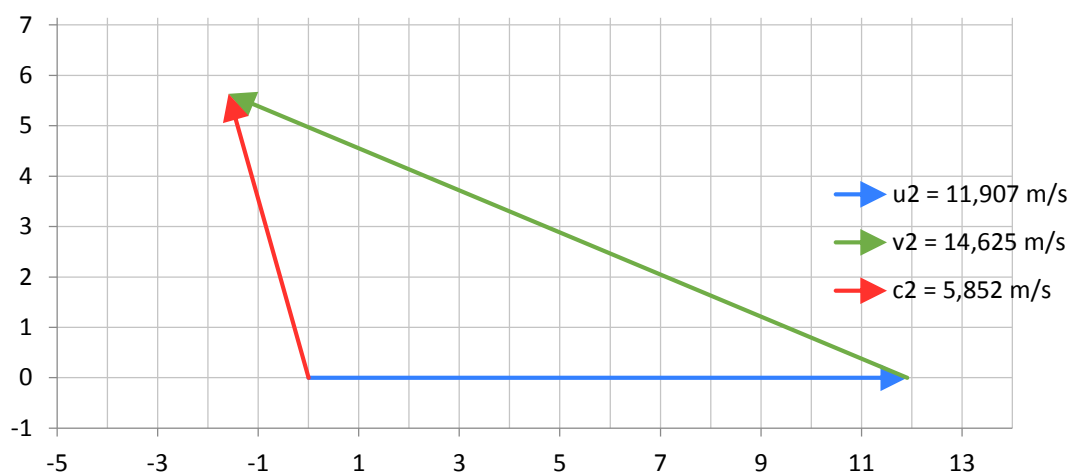
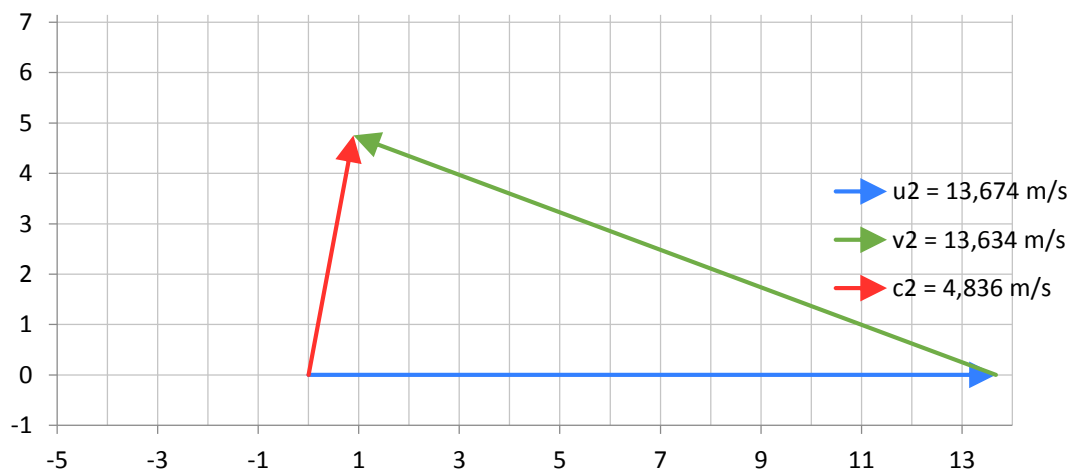
**6. varianta H = 4 m -  $\eta_{11}$  MIN****6. varianta H = 4 m -  $\eta$  MAX****6. varianta H = 4 m -  $\eta_{11}$  MAX**

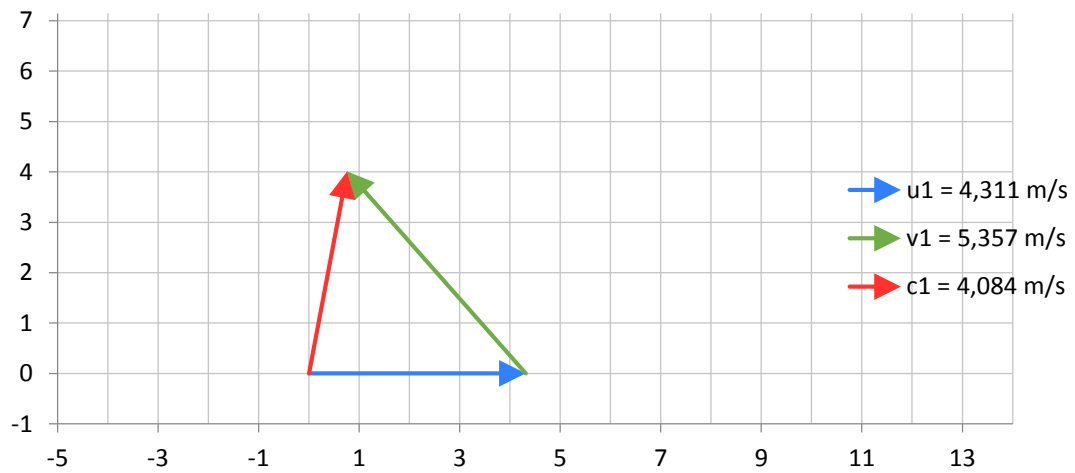
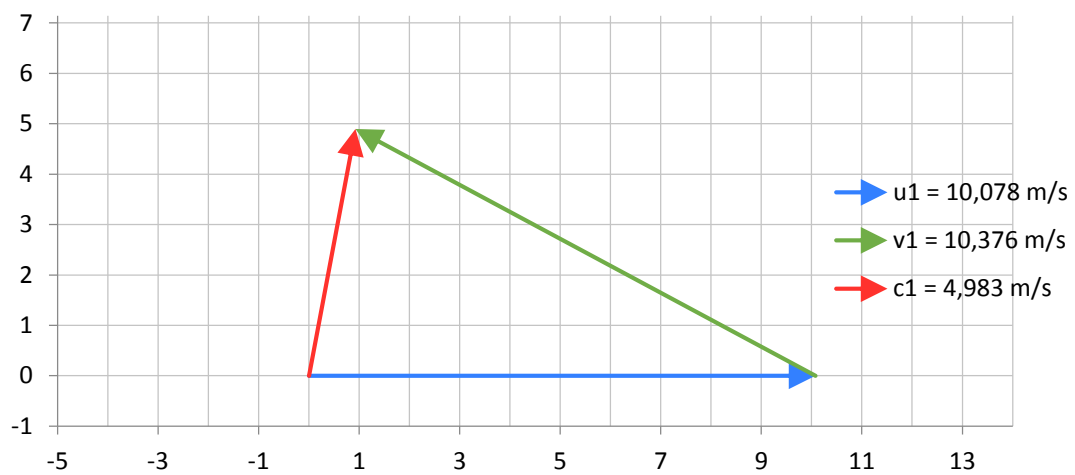
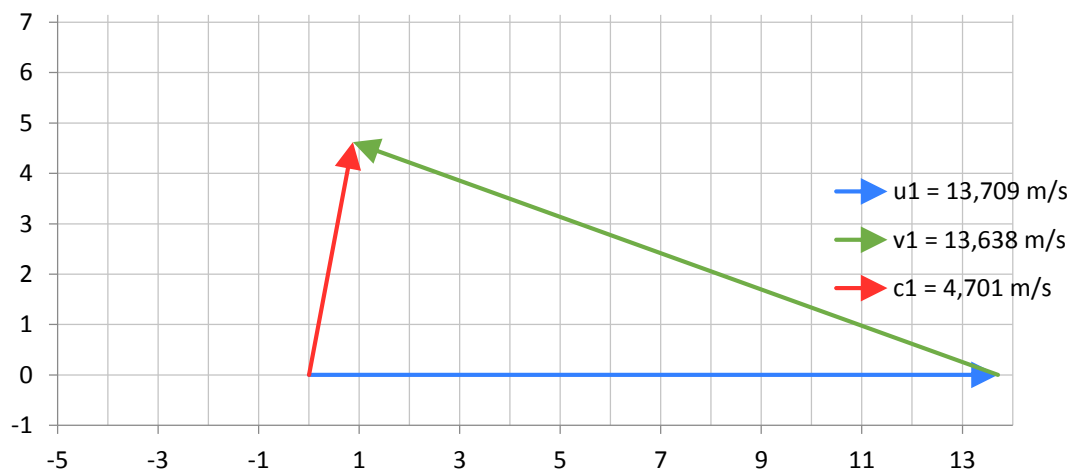
**6. varianta H = 4 m -  $\eta_{11}$  MIN****6. varianta H = 4 m -  $\eta$  MAX****6. varianta H = 4 m -  $\eta_{11}$  MAX**

**7. varianta  $H = 3\text{ m}$  -  $\eta_{11}$  MIN****7. varianta  $H = 3\text{ m}$  -  $\eta$  MAX****7. varianta  $H = 3\text{ m}$  -  $\eta_{11}$  MAX**

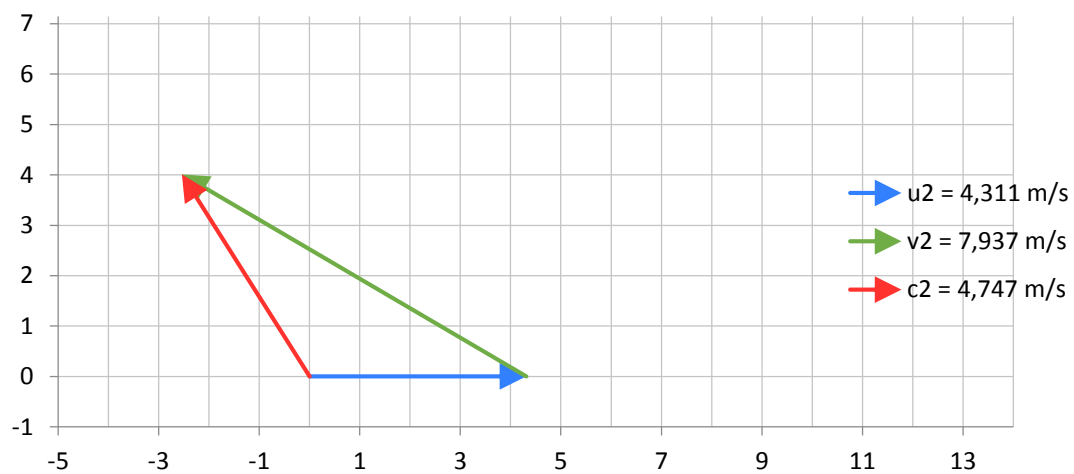
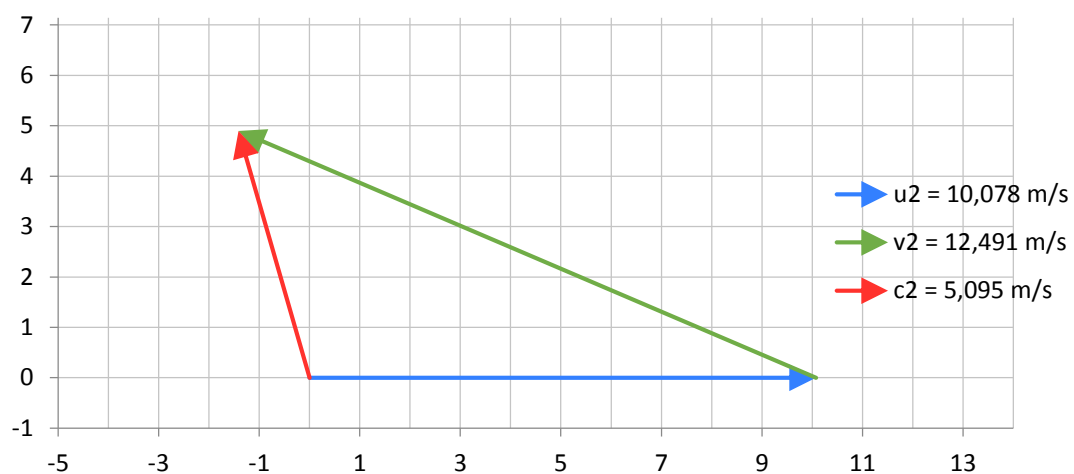
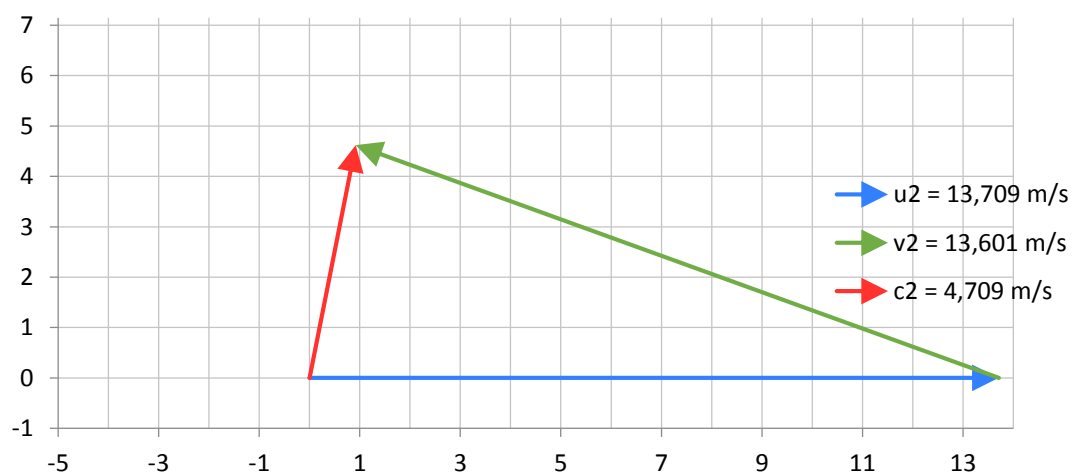
**7. varianta H = 3 m -  $\eta_{11}$  MIN****7. varianta H = 3 m -  $\eta$  MAX****7. varianta H = 3 m -  $\eta_{11}$  MAX**

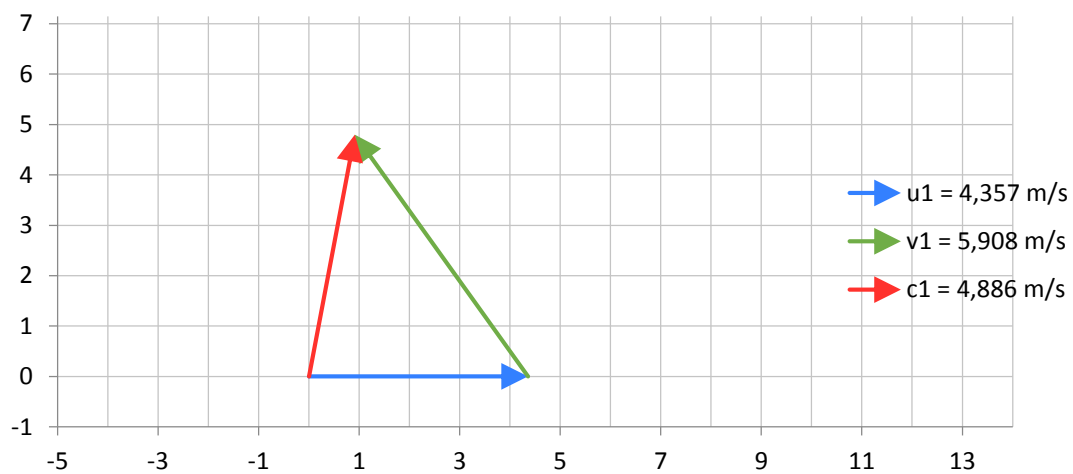
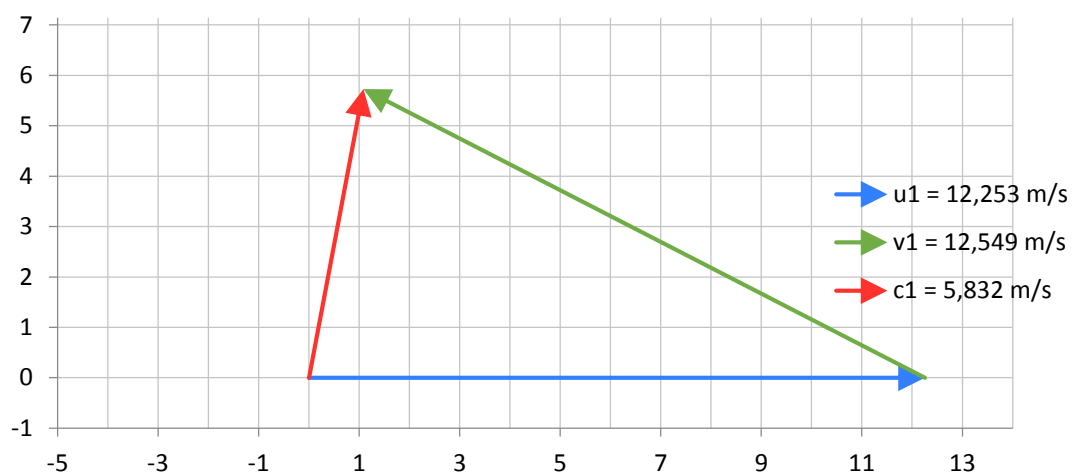
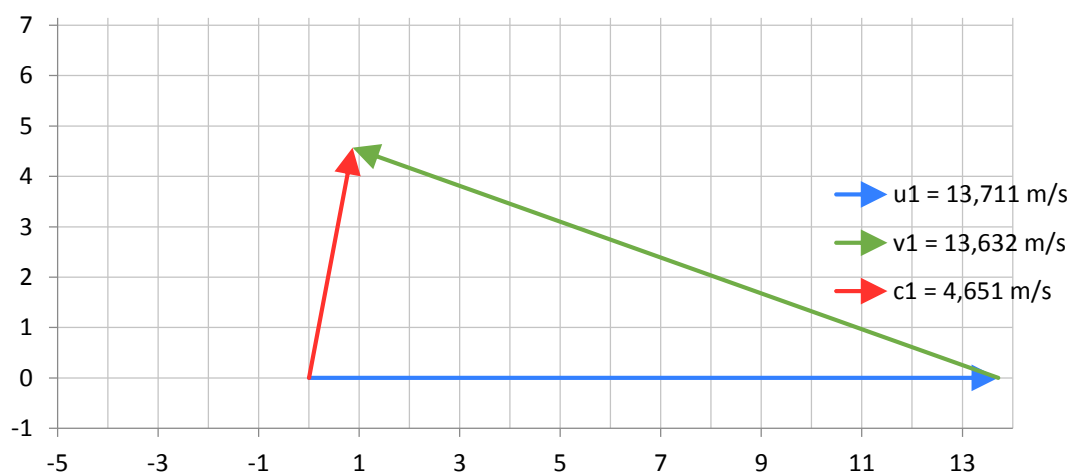
**7. varianta  $H = 4$  m -  $\eta_{11}$  MIN****7. varianta  $H = 4$  m -  $\eta$  MAX****7. varianta  $H = 4$  m -  $\eta_{11}$  MAX**

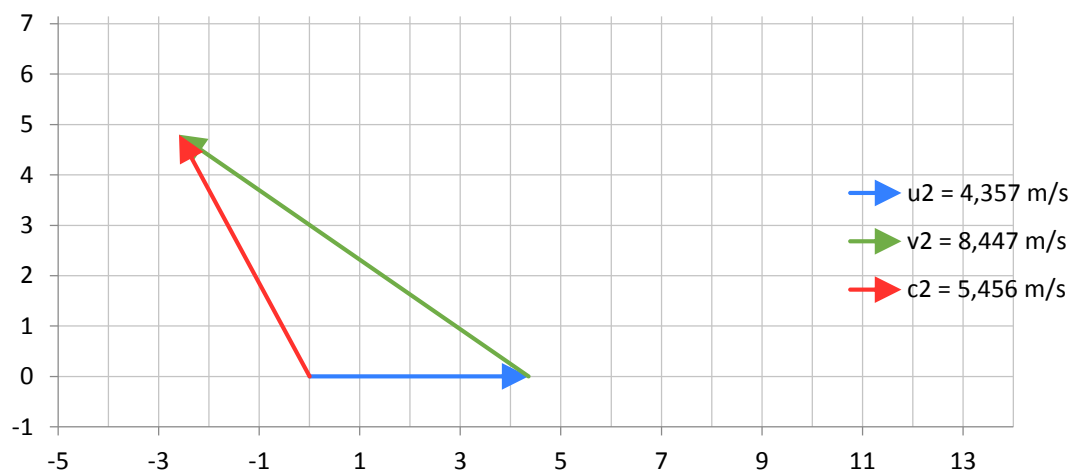
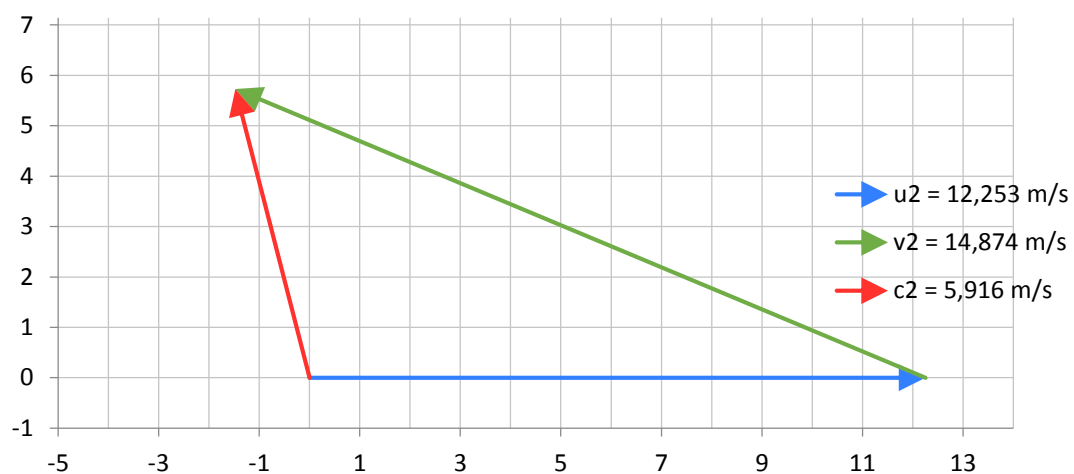
**7. varianta H = 4 m -  $\eta_{11}$  MIN****7. varianta H = 4 m -  $\eta$  MAX****7. varianta H = 4 m -  $\eta_{11}$  MAX**

**8. varianta H = 3 m -  $\eta_{11}$  MIN****8. varianta H = 3 m -  $\eta$  MAX****8. varianta H = 3 m -  $\eta_{11}$  MAX**



**8. varianta  $H = 3\text{ m}$  -  $\eta_{11}$  MIN****8. varianta  $H = 3\text{ m}$  -  $\eta$  MAX****8. varianta  $H = 3\text{ m}$  -  $\eta_{11}$  MAX**

**8. varianta  $H = 4$  m -  $\eta_{11}$  MIN****8. varianta  $H = 4$  m -  $\eta$  MAX****8. varianta  $H = 4$  m -  $\eta_{11}$  MAX**

8. varianta  $H = 4 \text{ m} - \eta_{11} \text{ MIN}$ 8. varianta  $H = 4 \text{ m} - \eta \text{ MAX}$ 8. varianta  $H = 4 \text{ m} - \eta_{11} \text{ MAX}$ 